EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

JOHN BOSLOUGH

Este libro constituye la primera obra de divulgación sobre la vida y el trabajo de uno de los grandes genios de nuestro siglo, el excepcional científico Stephen Hawking. A través de sus páginas nos adentramos en el misterioso mundo de los agujeros negros y de los puntos del Universo —las singularidades— en los que el espacio y el tiempo se desintegran de forma total, y retrocedemos hasta el origen de los tiempos para asistir al Big-Bang del que, probablemente, surgió el Universo.

S. Hawking fue comparado con Einstein por la revista *Time* y considerado como «el brujo» del espacio y el tiempo por la revista *Omni*. La vida de este genio científico es un claro ejemplo de lo que es capaz de llevar a cabo la mente humana ante todo tipo de adversidades; aquejado por el mal de Lou Gehring, Hawking ha permanecido en una silla de ruedas desde que tenía 20 años, y a pesar del pronóstico pesimista que los especialistas emitieron sobre su parálisis, Stephen Hawking, no sólo ha conseguido sobrevivir sino que, además, ha contribuido de manera fundamental a aumentar el bagaje de conocimientos sobre el Universo.

John Boslough es licenciado en Historia de la Ciencia por la Universidad de Princeton y ha trabajado como director de temas científicos en *U. S. News World Report*. En 1981 ya publicó una semblanza de Stephen Hawking en las revistas *Science* y *Reader's Digest*. Asimismo es colaborador científico de la revista *National Geographic*.



25

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING - John Boslough

SALVAT

JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT



JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

SALVAT

Versión española de la obra original norteamericana
Stephen Hawking's Universe publicada por
William Morrow and Company, Inc. de Nueva York

Traducción: DIORKI, Traductores

A mis padres

ISBN 0-688-03530-2 Edición original
ISBN 84-345-8246-5 Versión española
ISBN 84-345-8390-9
Depósito Legal: NA-44-1986
Publicada por Salvat Editores, S.A. - Mallorca, 41-49 - Barcelona
Impresa por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

Agradecimientos

Son varias las personas que han contribuido en la preparación de este libro. Quisiera expresar un especial agradecimiento a Stephen Hawking, por las muchas horas que me ha concedido en Cambridge, por sus luminosas descripciones sobre la belleza y la matemática del Cosmos, y por su atenta lectura de mi manuscrito. La recopilación entusiasta y meticulosa de fotografías realizada por Anne K. DuVivier ha sido fundamental también para el presente trabajo.

Quiero agradecer asimismo la colaboración de Murray Gell-Mann, que descuidó la recogida de setas en Aspen, Colorado, para hablarme sobre las relaciones entre la mecánica cuántica y la física relativista, y las oportunas observaciones aportadas por los colegas y antiguos colegas de Stephen Hawking, Ian Moss, Malcolm Perry, Kip Thorne y Roger Penrose.

Debo reservar un especial agradecimiento a Katherine y James Boslough por su apoyo y comprensión, así como a Jodi Cobb, que me ha animado continuamente. Gracias también para Dan O'Keefe, John Brockman, Katinka Matson, Deborah Elise White, Douglas Stumpf, Linda Creighton y Stewart Powell, que me han aguantado durante mis diversos viajes a Inglaterra.

Danzamos alrededor de un círculo y hacemos suposiciones, pero el Secreto se encuentra en el centro y posee el conocimiento.

Robert Frost

Prólogo

Aquella mañana primaveral de 1974 un joven elegantemente vestido era ascendido por la escalera de una mansión cuya columnata blanca se elevaba ante el parque londinense de St. James. Una vez dentro del edificio, el n.° 6 de Carlton House Terrace, el joven fue transportado en una silla de ruedas hasta el gran salón de actos en el que se le iba a conceder uno de los cargos honoríficos más importantes de Gran Bretaña: el ingreso en la Royal Society, institución científica de enorme prestigio en todo el mundo.

Con sus treinta y dos años, Stephen William Hawking se convertía en uno de los miembros más jóvenes que había tenido la mencionada sociedad a lo largo de su historia, honor que se le concedía en reconocimiento de su aportación a la física teórica. Según una tradición que se remonta al siglo XVII, los nuevos miembros electos de la sociedad debían subir al estrado para estrechar la mano del presidente y firmar en el libro de honor. En esta ocasión, sin embargo, Sir Alan Hodgkin, premio Nobel en biología y presidente de la sociedad, tuvo que llevar el libro hasta el lugar donde se encontraba la silla de ruedas de Hawking, en la parte anterior de la sala. Un prolongado silencio envolvió a los presentes cuando

el nuevo miembro comenzó a estampar su firma; al terminar, esbozó una amplia sonrisa y la sala estalló en un sonoro aplauso.

Conocí a Hawking siete años después, en uno de los pasillos que rodeaban el salón de actos donde se había celebrado el nombramiento anteriormente descrito. Fuimos presentados por Roger Penrose, matemático y físico teórico de la Universidad de Oxford. Penrose, viejo amigo y ayudante de Hawking, había ingresado también en la sociedad dos años antes, en parte por los trabajos que habían realizado ambos en colaboración.

Hawking padecía desde 1962 una extenuante enfermedad derivada de un trastorno en el sistema motor neuronal. Poco a poco, la enfermedad se había extendido a la mayor parte de las funciones nerviosas y musculares, de forma que había quedado impedido para andar y apenas podía hablar. Penrose y otras personas próximas a Hawking me habían advertido de que probablemente su estado era peor de lo que podía haberme imaginado.

Al verle, en efecto, quedé anonadado. Ante mí se encontraba, hundido en su silla de ruedas, uno de los científicos más eminentes del mundo. No era mucho mayor que yo, y calculé que su peso no debía exceder los 50 kilos. Debido a su extrema consunción, resultaba imposible determinar su altura, si bien parecía tener una estatura aproximada de 1,80 m. Su rostro era juvenil, pero su cuerpo mostraba la fragilidad y la estructura muscular de un anciano decrépito.

Cuando terminaron las presentaciones, Hawking comenzó a hablar con una voz tan baja que tuve que inclinarme para escuchar. Hacía un gran esfuerzo para articular los sonidos, y su voz era como un gemido interrumpido por frecuentes boqueadas. Miré a Penrose en busca de ayuda, y éste se apresuró a explicarme lo que había dicho Hawking: «Le veré en mi oficina el próximo martes a las once en punto.»

Un rato después pregunté a Penrose si aquél había sido un día particularmente malo para Hawking, a lo que me respondió que, por el contrario, pensaba que su colega se encontraba bastante bien.

He estado con Hawking muchas veces en Cambridge y en Estados Unidos, y cada vez que le veo me admira más su personalidad. Lleva cerca de doce años sin poder andar y su voz es tan débil que sólo algunos íntimos pueden entenderle, y, sin embargo, ha sido capaz de dar un importantísimo paso en el campo de la física teórica, hasta el punto de que ha conseguido modificar la visión que teníamos del Universo.

A medida que he ido conociendo a Hawking, la verdad se me ha ido mostrando con claridad. Su éxito no se debe sólo a su deseo de vivir o al hecho de ser un superviviente, aunque ciertamente es un hombre muy fuerte y obstinado. La clave de su triunfo es su inteligencia; al ver disminuidas sus capacidades físicas durante dos décadas como consecuencia de los trastornos ocasionados por su enfermedad, se dedicó de lleno a vivir un vida intelectual.

Para Hawking el pensamiento es su instrumento más poderoso, además de otras muchas cosas: su trabajo, su diversión, su descanso, su pasión, su vida... Su silla de ruedas constituye una ventaja muy especial en la tarea de afrontar su mayor preocupación: el Universo en que vivimos, su origen, su funcionamiento y su final. Totalmente dedicado a la actividad intelectual, Hawking ha demostrado la capacidad que tiene la mente humana para sondear el Universo cuando en dicha tarea actúa un carácter infatigable impulsado por una absoluta libertad.

Índice de capítulos

1. Quarks y quasars

«La aventura más grande y persistente de la historia humana es esta búsqueda de la comprensión del Universo, de su funcionamiento y su origen. Resulta difícil pensar que un puñado de seres habitantes de un minúsculo planeta que gira en torno a una estrella insignificante perteneciente a una pequeña galaxia, se hayan propuesto el objetivo de alcanzar la comprensión total del Cosmos, resulta difícil pensar que una partícula ínfima de la creación confíe plenamente en su capacidad de entender la totalidad.»

El autor de esta frase, Murray Gell-Mann, pertenece al grupo de físicos teóricos empeñados en esta aventura. El trabajo de estos científicos se centra en la búsqueda de una hipotética interacción única producida en el corazón del Universo, por la que se pudiera explicar la totalidad de los fenómenos físicos que nos circundan.

La tarea de encontrar esta interacción única es tan ingente que incluso sobrepasó las posibilidades de Einstein, que pasó los últimos treinta años de su vida buscando inútilmente la unidad universal. Hoy, casi treinta años después de la muerte de Einstein, estamos un poco más cerca de esa meta, aunque el Universo parece funcionar conforme a un grupo de leyes que actúan a diversos niveles independientes entre sí.

La gravedad, la más evidente de estas leyes básicas de la naturaleza, rige sobre los grandes objetos existentes en el Universo (las estrellas, los planetas, usted y yo). Las otras tres leyes descubiertas por los científicos actúan en los niveles subatómicos: la interacción nuclear fuerte, cuyo poder es varios trillones de veces superior al de la gravedad, es la que mantiene unidos los componentes del núcleo atómico; el electromagnetismo, cuya fuerza hace girar a los electrones en torno al núcleo, es el que aporta a la materia normal su apariencia sólida; la interacción nuclear débil es la que produce la desintegración radiactiva de ciertos átomos, como el uranio.

Atrapado en su laberinto matemático, Einstein fue incapaz de conciliar estos distintos grupos de leyes naturales. Estaba profundamente convencido de que tras estas leyes se encontraba una explicación sencilla en la cual se resumiría una única ley que incluiría a todas las demás. Esta convicción se basaba en una pura apreciación estética, según la cual todo podría explicarse a partir de un irreductible sistema de ecuaciones.

Sin embargo, no todos los físicos creen que una unificación semejante sea posible. El teórico austriaco Wolfgang Pauli bromeaba en cierta ocasión diciendo: «Lo que Dios ha separado, que no lo una el hombre.» En cualquier caso, la ciencia actual no precisa de una teoría unificada para seguir progresando. La necesidad que tienen los físicos de una teoría unificada es la misma que podía tener Edmund Hillary para escalar el monte Everest.

Si llegara a encontrarse una ley de este tipo, ello podría ser absolutamente irrelevante o, por el contrario, podría significar el nacimiento de una nueva edad de oro para la ciencia. Los científicos actuales no pueden saberlo, al igual que no supieron en el pasado que la teoría de la unificación de la masa y la energía de Einstein iba a suponer el inicio de la edad del átomo, o que la mecánica cuántica (sistema matemático utilizado por los físicos para explicar el movimiento de las partículas subatómicas) iba a ser empleada para producir el primer rayo láser. Sin embargo, algunos científicos siguen manteniendo una esperanza casi religiosa en la búsqueda de una teoría unificadora, que se muestra como una especie de visión Zen de la realidad según la cual toda la energía y la materia de la naturaleza procedería de una única fuente.

Si observamos el mundo que nos rodea en la actualidad, no parece demasiado probable una reconciliación de fuerzas tan diversas. El Universo en el que vivimos es frío y bajo en energía, de forma que la materia y las fuerzas energéticas muestran una gran estabilidad y desconexión. Sin embargo, el Universo no ha sido siempre como hoy lo vemos. Desde el momento de su origen, el Cosmos ha ido enfriándose constantemente. A medida que se enfriaba, el Universo recién nacido iba dejando una estela de rastros que han permitido a los físicos remontar el proceso hasta los orígenes. Justo en ese momento, cuando se produjo el estallido del Big Bang, o poco después, es donde, según la mayoría de los físicos, se encuentra la clave del Universo. En ese instante, en medio de la intensa energía del cataclismo primordial, pudo producirse una interacción de las cuatro fuerzas durante el plazo de una fracción de segundo. Según se cree, esta interacción básica pudo ser el origen de todas las demás fuerzas subsiguientes.

Sirviéndose de las construcciones matemáticas más recientes, los físicos teóricos han desarrollado una idea aproximada de lo que sucedió en el instante inmediatamente posterior al Big Bang, en un espacio de tiempo inferior a una mil trillonésima de segundo. Aunque éste es un logro muy notable, las ecuaciones matemáticas no han permitido, sin embargo, retroceder el tiempo suficiente como para contemplar el momento en el que estuvieron unificadas todas las fuerzas de la naturaleza.

Posteriormente, cada una de las cuatro fuerzas ha tenido un período de predominio en la historia del Universo, al igual que sucede con la sucesión hegemónica de los partidos políticos en los sistemas democráticos. La fuerza más importante en nuestro Universo es la gravedad, más débil aunque también más penetrante que las otras. Esta fuerza ejerce su influencia sobre los objetos más lejanos y diminutos que se conocen en el Universo (galaxias, estrellas, quasars), en un campo de acción que abarca enormes distancias. La gravedad ha sido el factor más importante durante casi toda la existencia del Universo, estimada en unos catorce o quince mil millones de años. Anteriormente, en los primeros segundos posteriores al Big Bang, la fuerza predominante fue la nuclear débil, y antes aún el electromagnetismo.

Es probable que la interacción nuclear fuerte predominara casi totalmente durante las primeras billonésimas de segundo siguientes al Big Bang, cuando la materia y la energía constituyeron una sola cosa durante escasos instantes, antes de que comenzaran a desarrollarse las estrellas y las galaxias. En las primeras billónesimas de segundo de la historia del Cosmos, la cantidad de energía liberada fue tan intensa que ninguna de las cuatro fuerzas pudo distinguirse de las demás, o al menos, así lo creen la mayoría de los teóricos de la Física.

«La tarea de los físicos teóricos, mediante la utilización de los instrumentos matemáticos de que se dispone, es la de sacar a la luz lo que sucedió antes de que el enfriamiento del Universo provocara la división de las fuerzas y el consiguiente oscurecimiento de la interacción fundamental»; era la opinión de Sheldon Glashow, teórico de Harvard con el que conversé en agosto de 1982 en el Centro Físico de Aspen. «Mucha gente, incluyéndome a mí mismo —continuaba diciéndome—, trabaja en la resolución de este gran problema. Sin embargo, nadie ha podido demostrar que todas las interacciones hayan estado efectivamente unidas en el origen del Universo.»

Glashow ha sido uno de los científicos más destacados en la búsqueda de la interacción fundamental. Durante la década de los sesenta intentó, sin éxito, agrupar ciertas partículas subatómicas de corta vida de manera que pudiera encontrarse el camino hacia esta fuerza unificadora. Su intento dio como resultado la formulación de enigmas matemáticos inexplicables e insolubles.

Steven Weinberg, entonces perteneciente al Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Abdus Salam, del Colegio Imperial de Londres, tuvieron más éxito en sus investigaciones. Sus trabajos, desarrollados de forma independiente, se materializaron en 1967 en una serie de ecuaciones que parecían demostrar que, siempre que se ignoren ciertos factores oscuros, la interacción nuclear débil y el electromagnetismo constituyeron una única fuerza en algún momento.

Lo más interesante del modelo de Weinberg y Salam era que, en condiciones especiales, se podía prever lo que iba a suceder en los aceleradores de partículas, es decir, en los desintegradores atómicos que utilizan los físicos para separar las distintas partes de los átomos. Weinberg, Salam y Glashow compartieron el Premio Nobel en 1979 por sus trabajos en este campo.

Durante la década de los setenta otros físicos desarrollaron distintos sistemas matemáticos por los que se intentaba demostrar que la interacción nuclear fuerte, que se verifica en los núcleos de los átomos, también había estado unida al grupo formado por la interacción nuclear débil y el electromagnetismo. Estos sistemas de cálculo matemático se llaman "grandes teorías unificadas" o GUT *(Grand Unified Theories)*.

Algunos científicos no están tan seguros de que estas teorías sean plenamente satisfactorias. Según dice Murray Gell-Mann, las GUT «no son grandes ni unificadas. Podría decirse incluso que ni siquiera son teorías, sino meros modelos magnificados.» No obstante, Murray admite que estas teorías

constituyen uno de los pasos más importantes para llegar al descubrimiento de la interacción fundamental.

El propio Gell-Mann fue el creador del concepto de los quarks, partículas sub-subatómicas consideradas por la mayoría de los científicos como los componentes básicos de los protones y neutrones que constituyen el núcleo de todos los átomos del Universo. Antes de que Gell-Mann los concibiera y les pusiera nombre (para lo cual se inspiró indirectamente en un verso del *Finnegans Wake* de James Joyce que dice: «Tres quarks para Muster Mark»), los elementos atómicos se encontraban en un estado de desorden, al no haberse podido definir las docenas de nuevas partículas halladas en los aceleradores durante las décadas de 1950 y 1960. Como resultado de la síntesis de los quarks realizada por Gell-Mann, los físicos dedicados al estudio de estas partículas volvieron a contemplar al núcleo atómico como un minúsculo universo con su propio orden más o menos definido.

Gell-Mann reconoce que le gustaría llegar a ver la unificación de las cuatro fuerzas, pero no está seguro de que ello pueda conseguirse en los años que le restan de vida: «Ni siquiera se ha podido demostrar que las tres fuerzas que actúan en el átomo tengan un mismo fundamento. Es posible que algunos estén a punto de lograrlo. No lo sé, pero, en cualquier caso, a mí nadie me lo ha demostrado aún.»

¿Y qué hay de la gravedad, la fuerza con la que estamos más familiarizados? ¿Cómo se ajusta a la gran unificación? Aunque los físicos estén próximos a descubrir una teoría unificada sobre el Universo a partir de las tres fuerzas que provocan la atracción y la repulsión de las partículas subatómicas, lo cierto es que la gravedad se está quedando fuera del esquema. No obstante, cada vez se hace más evidente la convergencia última entre el vasto mundo cosmológico y el minúsculo universo del átomo, por cuanto que los físicos nucleares y los cosmólogos comienzan a comprender que, a

través de sus gigantescos aceleradores de partículas y de sus telescopios, están viendo una misma realidad.

Existen varios grupos de científicos que se dedican al estudio de la unificación de las cuatro fuerzas, intentando añadir la gravedad a las otras tres. En cierta ocasión Gell-Mann me dijo: «La mayoría de ellos no saben lo que están haciendo. Sólo se dedican a emplear diversos trucos matemáticos.» No obstante, reconocía con cierta cautela que había un grupo de teóricos que estaban en condiciones de hacer algún progreso en la búsqueda de este gran secreto del Universo.

Este grupo estaba encabezado por Stephen Hawking, en la universidad inglesa de Cambridge. «Hawking es el único que comprende las partículas físicas desde el punto de vista de la relatividad», decía Gell-Mann; «es un hombre extraordinario, un individuo absolutamente sorprendente.»

2. Contra todo obstáculo

Stephen Hawking nació en el seno de una familia muy culta y unida. Era el mayor de cuatro hermanos y su padre era un biólogo que trabajaba en la investigación de enfermedades tropicales en el Instituto Nacional para la Investigación Médica. La infancia de Stephen, que había nacido el 8 de enero de 1942 en Oxford, transcurrió en Londres y en la ciudad de St. Albans, situada a unos 32 kilómetros al norte de la capital. A los once años sus padres le metieron en St. Albans School, un colegio privado que podría suministrarle la preparación necesaria para ingresar en la Universidad de Oxford.

Entre los ocho y los nueve años Stephen sintió la vocación de ser científico. En aquella época ya había demostrado tener una gran habilidad para desmontar relojes y radios con el fin de conocer su mecanismo de funcionamiento, y la ciencia se le aparecía como la forma en que se podía dilucidar la verdad sobre las cosas que veía a su alrededor. Sin embargo, durante su adolescencia se dio cuenta de que una gran parte de la ciencia era demasiado imprecisa. «Las ciencias biológicas eran demasiado descriptivas y confusas para mí», recuerda Hawking. «Por supuesto, hoy se ha adquirido un mayor grado de exactitud gracias a la biología molecular.» Cuando

tenía catorce años comenzó a mentalizarse de que debía ser matemático o físico. Su padre, preocupado por el porvenir del muchacho, intentó convencerle, sin éxito, de que con esas profesiones le sería muy difícil encontrar trabajo.

Por aquella misma época, Hawking comenzó a volverse escéptico. A los quince años reprodujo los experimentos sobre lanzamiento de dados que se estaban realizando en el programa extrasensorial de la Universidad de Duke durante la década de los cincuenta. Después de estudiar durante algún tiempo los experimentos de Duke, llegó a la conclusión de que la ESP (percepción extrasensorial) era un completo fraude. «Cuando los experimentos daban resultado», explica Hawking, «las técnicas experimentales fallaban, y cuando las técnicas experimentales funcionaban bien, los resultados no eran satisfactorios.»

En la actualidad sigue pensando que la parapsicología es una pérdida de tiempo. Como me dijo una vez bromeando: «La gente que se toma en serio esas cosas se ha quedado al mismo nivel en que me encontraba yo a los catorce años.»

A pesar de estos destellos ocasionales de precocidad, Hawking no destacó especialmente en los estudios secundarios. Su padre, preocupado ante un posible suspenso en el examen de ingreso a Oxford, intentó utilizar sus influencias en el University College, del que había sido alumno, para conseguir la admisión de su hijo. Sin embargo, la capacidad de Stephen había sido subestimada por su padre. El joven obtuvo una puntuación casi perfecta en las pruebas de física del examen de ingreso y se desenvolvió de una forma tan satisfactoria en la parte de la entrevista que su admisión quedó asegurada; de este modo, en 1959 se matriculó en Oxford.

Hawking fue un estudiante muy conocido en la universidad, tanto por su inteligencia como por su destreza en las regatas de botes de ocho remos, en las que participaba como timonel. Casi todas las personas que le conocieron en sus

días de estudiante le recuerdan como un alegre joven de pelo largo y aficionado a la música clásica y la ciencia ficción. Hawking adoptó un forma particularmente independiente y libre de enfrentarse a sus estudios, aunque su tutor, el doctor Robert Berman, recuerda que tanto él como otros profesores eran conscientes de que Hawking poseía una capacidad intelectual de primera categoría, «completamente diferente a la de sus compañeros.»

Su facilidad para el estudio de la física era tal que apenas tenía que esforzarse en ello. «Ningún estudiante de física podía competir con él», recuerda Berman. «Podía resolver cualquier problema que se le presentase sin ningún esfuerzo.» En cierta ocasión, después de leer en clase la solución que había preparado para un problema, hizo una pelota con el papel y la arrojó desdeñosamente a través del aula hasta la papelera.

Hawking demostró tener mala memoria en ciertos momentos cruciales (o convenientes). Durante su último año en Oxford solicitó un empleo en el Ministerio de Trabajo británico. En aquella ocasión se olvidó de acudir al examen requerido para proveer el empleo. Si hubiera pasado la prueba, quizá hubiera terminado trabajando como guardián de monumentos.

Al llegar el momento de su graduación, Hawking tenía que alcanzar la mejor puntuación para obtener la beca del programa de física para licenciados de la Universidad de Cambridge, la antigua rival de Oxford, situada a 140 km al nordeste de ésta. Al responder sobre sus proyectos futuros en el examen final oral, dijo al profesor: «Si obtengo el primer puesto, iré a Cambridge; si obtengo el segundo, me quedaré en Oxford. Por eso, espero que me dé usted el primer puesto.» Los que le conocen confirman que ésta es una de sus típicas respuestas.

El doctor Berman contaría más tarde refiriéndose a la entrevista de Hawking con los profesores que le examinaban

que, «por lo menos éstos eran lo suficientemente inteligentes como para comprender que estaban hablando con alguien más inteligente que ellos.» Hawking obtuvo el primer puesto y, al año siguiente, se matriculó en el programa para graduados de Cambridge.

Por aquel entonces Hawking había decidido dedicarse a la física teórica y especializarse en cosmología. Había considerado otras posibilidades dentro de la física, pero ninguna de ellas captó su atención por mucho tiempo. En cierta ocasión, durante un curso especial de verano en el Real Observatorio de Greenwich, colaboró con Sir Richard Woolley, Astrónomo Real de Gran Bretaña, en la medición de los componentes de una estrella doble. Cuando miró por el telescopio del observatorio, se llevó una profunda decepción al comprobar que lo único que podía verse eran dos manchas borrosas que continuamente se desenfocaban.

Desde entonces Hawking sólo ha vuelto a mirar una o dos veces por un telescopio, y su desdén hacia la astronomía visual ha permanecido inalterado. Para él siempre ha sido más apasionante la teoría de la física, y especialmente la cosmología, por cuanto que en ella se plantea el gran enigma del origen del Universo.

Durante la época en que asistía al curso para licenciados, Hawking comenzó a dar muestras de sus grandes posibilidades como físico teórico. Roger Penrose, que entonces era profesor adjunto de investigación en el King's College de Londres, recuerda su primer encuentro con Hawking durante aquellos días. «Solía hacer las preguntas más complicadas, las más difíciles de responder», cuenta Penrose; «siempre incidía en la parte más débil de tus argumentos. Sin embargo, no era fácil imaginar entonces la originalidad que iba a adquirir su pensamiento en el futuro.»

A comienzos de su primer año en la escuela para licenciados aparecieron los síntomas iniciales de su grave enfermedad; una ligera parálisis entorpecía sus movimientos impidiéndole atarse los zapatos y, en ocasiones, articular bien las palabras. Tras las primeras molestias, los médicos le diagnosticaron una esclerosis lateral amiotrófica, una enfermedad del sistema motor neuronal que puede llegar a producir una parálisis total; este trastorno también es conocido como el mal de Lou Gehrig, por ser éste el primer norteamericano que murió como consecuencia de sus efectos. Asimismo, es la enfermedad que se llevó la vida de David Niven en 1983.

La enfermedad del sistema motor neuronal se caracteriza por causar una desintegración gradual de las células nerviosas de la medula espinal y el cerebro que regulan la actividad muscular voluntaria. Los primeros síntomas son una debilidad general y contracciones en las manos, que a veces se acompañan con dificultades para hablar y tragar. A medida que las neuronas dejan de funcionar, los músculos que se hallan bajo su control se van atrofiando; el enfermo va quedando cada vez más incapacitado, aunque su cerebro mantiene la lucidez. La muerte suele producirse como consecuencia de neumonía o asfixia provocadas por el fallo final de los músculos respiratorios.

Los médicos confiaban en que la enfermedad de Hawking podría estabilizarse, pero su estado continuó deteriorándose. Le dijeron que su vida no podría durar más de un par de años. «Como es lógico, quedé muy deprimido por el pronóstico», recuerda Hawking. La perspectiva de una muerte tan próxima le sumió en un profundo estado de depresión e introversión durante dos años, en los cuales apenas trabajó en sus investigaciones, dedicándose la mayor parte del tiempo a escuchar música clásica (sobre todo Wagner) y a leer libros de ciencia ficción. Asimismo, en aquella época comenzó a beber "en gran cantidad".

El tutor de su curso, un físico teórico llamado Dennis Sciama, que dirigía el grupo de estudios sobre la relatividad

general de Cambridge, conocía las posibilidades de su alumno y sentía una gran preocupación por su enfermedad. «Siempre presentía la solución a los problemas que tratábamos», cuenta el profesor. «Lo que a otros alumnos destacados les llevaba dos años de estudio, Stephen lo resolvía en un solo mes. Ante cualquier afirmación que hicieras, él siempre oponía algún pero.» Sciama fue condescendiente con la depresión de Hawking. Comprendía que quisiera embriagarse para olvidar sus problemas, pero le parecía muy mal que dejara de trabajar en su tesis.

Por eso, en un momento determinado, decidió actuar y llamó al padre de Hawking para que ayudara al joven a acabar pronto su trabajo.

Por fin, con el paso del tiempo, la enfermedad de Hawking comenzó a estabilizarse. El joven científico comprendió que la muerte no era inminente. Empezó a recuperar los ánimos y, contando siempre con el apoyo de sus amigos, sus familiares y su tutor, volvió a adoptar su optimismo habitual. Asimismo, comenzó a darse cuenta de que estaba trabajando en un campo de estudio puramente intelectual, en el que la habilidad física no tenía ninguna importancia. La enfermedad no había afectado a su mente ni podría afectar a su trabajo. La depresión psíquica desapareció y, animado por Sciama, se puso a trabajar de nuevo en su tesis.

Por aquella época tuvo lugar uno de los acontecimientos más importantes de la vida de Hawking: en una fiesta conoció a Jane Wilde, una joven que estudiaba idiomas en Londres. En 1965, después de dos años de noviazgo transcurridos entre Londres y Cambridge, los dos jóvenes se casaron. «Le conocí en los primeros tiempos de su enfermedad», cuenta Jane, «por lo que nunca supe cómo era Stephen cuando estaba sano y fuerte. Simplemente decidí lo que tenía que hacer y lo hice.»

El matrimonio constituyó un momento decisivo en la vida

de Hawking. «Fue lo que me impulsó a vivir, a continuar. Jane me dio en verdad el deseo de vivir.»

Todos los que conocen a Jane Wilde Hawking la describen como una mujer excepcional. Durante el primer año de su matrimonio viajaba todos los días de Cambridge a Londres para concluir sus estudios, y en los ratos libres pasaba a máquina la tesis de su marido. A lo largo de casi dos décadas Jane se ha hecho cargo de los cuidados físicos de su marido y ha conseguido que la vida de la familia se desarrolle con una relativa normalidad, a pesar de la incapacidad de Hawking y de la notoriedad que éste ha adquirido en los últimos tiempos. El matrimonio tuvo su primer hijo, Robert, en 1967. Su hermana Lucy llegó tres años después, y Timothy nació en 1979.

Aunque Jane y las demás personas cercanas a Stephen tenían siempre una actitud extremadamente protectora hacia él, todos ellos intentaban ignorar su incapacidad. «Stephen no hace ninguna concesión a su enfermedad, y yo tampoco le hago ninguna concesión a él», dijo Jane en cierta ocasión. El mayor problema de su vida no es la incapacidad física de su marido, sino el no poder entender totalmente sus estudios de física teórica.

Tras obtener el doctorado, Hawking pasó tres años trabajando como profesor adjunto de investigación en Cambridge, y comenzó a colaborar con Penrose en lo que iba a ser su trabajo de investigación más importante, la comprobación matemática del comienzo del tiempo. Su condición física volvió a deteriorarse, y a principios de los años setenta Hawking se vio obligado a vivir permanentemente en una silla de ruedas. Sin embargo, ello no supuso ninguna limitación para su mente, que se encontraba entonces en la cima de sus posibilidades. Su ingreso en la Royal Society en 1974 fue un éxito conmovedor para un hombre que, sólo una década antes, pensaba que no llegaría ni a los veinticinco años.

Aquella fue una época feliz para Jane y Stephen Hawking, tanto en el aspecto profesional como en el personal. Desde entonces su enfermedad parece haberse estabilizado, aunque algunos de sus colegas piensan que desde hace un año o dos se ha hecho más difícil entenderle cuando habla. Algunos amigos suyos, sobre todo los que no le ven con frecuencia, temen que su estado general haya comenzado a empeorar de nuevo durante estos últimos años.

El sucio edificio de ladrillo que alberga el Departamento de Matemáticas Aplicadas y Física Teórica en el que trabaja Hawking parece una fábrica decimonónica abandonada y perdida entre las fachadas y agujas góticas de Cambridge. Su puerta principal da a una callejuela que comunica con Silver Street. En otra calle situada en la parte trasera del edificio se halla la rampa de siete metros y medio que utiliza Hawking para llegar a la puerta giratoria que da acceso al departamento. Todos los días se traslada hasta allí en su silla de ruedas motorizada desde su domicilio, situado a unos 800 metros de distancia, en el primer piso de una casa victoriana de West Road.

Su estudio, ubicado junto a una gran sala gris y deslucida, tiene el aspecto de un laboratorio medieval. En su interior se encuentran estanterías llenas de libros de física, una terminal de computadora, retratos de sus tres hermosos hijos y un aparato especial para pasar páginas que consiguió Hawking tras una dura lucha con la burocracia universitaria. Hay también un teléfono adaptado que ahora no se utiliza, y las paredes están cubiertas por textos científicos pegados con celofán, de forma que Hawking pueda verlos con facilidad.

Es casi imposible comprender a Hawking la primera vez que se habla con él. Después de dos horas de escuchar atentamente sus débiles y monótonas palabras (traducidas por Judy Fella, su joven secretaria), me di cuenta de que ya podía entender la mitad de las cosas que decía. Algunas palabras eran incomprensibles incluso para Fella, que había trabajado con él durante años, por lo que Hawking se veía obligado a deletrearlas. Bromeando, le dije que, para un norteamericano, parte de la dificultad en entenderle se debía a su acento británico.

Cuando trabaja, su cuerpo se hunde a veces en la silla de ruedas mientras su cabeza se desploma sobre su pecho. Casi no tiene ningún control sobre los movimientos de su cabeza y su cara, y su sonrisa se transforma en ocasiones en una mueca grotesca. No obstante, la primera vez que fui a su estudio, Hawking me recibió con una sonrisa traviesa, acentuada por la expresión de sus ojos azules, que brillaban detrás de las gruesas lentes de sus gafas.

Su pelo castaño, salpicado de canas, está cortado a la moda de los Beatles de comienzos de los sesenta, y su vestimenta habitual reproduce la imagen típica del científico: pantalones holgados, corbata llamativa y con frecuencia mal conjuntada con camisas de amplias rayas, chaqueta de sport de tela o lana y zapatos o botas flexibles de tipo universitario, cuyas suelas permanecen obviamente sin estrenar.

Hawking piensa las cosas con cuidado antes de hablar, para no tener que repetirlas. No le gusta decir más palabras de las necesarias. A veces, después de descansar durante algunos minutos para despachar algún asunto administrativo o para tomar el té, reanuda rápidamente su trabajo en el mismo punto en que había dejado de hablar. Actúa como si no tuviera ninguna limitación física, de tal forma que, al cabo de un rato, yo mismo acabo abstrayéndome de su situación.

Cierto día olvidé totalmente su enfermedad, de forma que me puse a contarle sin ninguna reserva las molestias que sentía en el codo como consecuencia de una lesión que había sufrido el día anterior durante un partido de squash en Londres. Hawking no hizo ningún comentario; se limitó a salir de la ha-

bitación en su silla de ruedas hacia el vestíbulo, donde me esperó para reanudar la conversación sobre el tema habitual, la física teórica.

La mayor parte de los días, el trabajo de Hawking consiste únicamente en pensar. Una gran parte de su tiempo lo emplea en desarrollar nuevos enfoques sobre los problemas de la física teórica. Uno de sus colegas, Ian Moss, me dijo una mañana: «Stephen aborda todas las ideas; los demás nos limitamos a comprobarlas para ver si funcionan.»

Hawking está dotado de una memoria prodigiosa. Es capaz de desarrollar y retener páginas y páginas de complejas ecuaciones, relacionando entre sí los jeroglíficos matemáticos con la misma facilidad con que una persona normal ordena las palabras de una frase. Werner Israel, físico teórico de la Universidad de Alberta y coautor, junto con Hawking, del libro titulado *General Relativity,* afirma que la excepcional memoria de su colega es comparable a la de Mozart, que era capaz de componer sinfonías enteras sin necesidad de escribir inmediatamente las partituras.

Las personas cercanas a Hawking no dejan de asombrarse de su capacidad memorística. Una secretaria que trabajó para él cuando visitó el Instituto de Tecnología de California, contó que en cierta ocasión el científico se acordó de un pequeñísimo error que había tenido veinticuatro horas antes cuando le dictaba (de memoria) cuarenta páginas de ecuaciones.

Asimismo, uno de los alumnos de Hawking me dijo que una vez, cuando le llevaba a Londres para asistir a una conferencia, recordó el número de la página de un libro que había leído hacía algunos años, en la que se encontraba un insignificante error. Otros físicos afirman que las complejas ecuaciones que elabora mentalmente son al mismo tiempo elegantes e inspiradas, lo cual constituye un extraordinario logro para un físico teórico.

El trabajo de Hawking ha atraído a Cambridge a un destacado grupo de físicos teóricos de ambos lados del Atlántico. Casi todos los días, a la hora del almuerzo y del té, todos ellos se reúnen con Hawking para compartir con él sus opiniones científicas. Formalmente, estas reuniones parecen tertulias decimonónicas, pero las conversaciones que se entablan parecen sacadas de un libro de ciencia ficción sobre el siglo XXI: situados a años luz del mundo que les rodea, los físicos saltan de los desplazamientos hacia el rojo y los resultados cuánticos a los agujeros negros y las singularidades producidas en el principio del tiempo.

La charla es rápida, y sólo se interrumpe por alguna puntualización o ratificación. Cuando uno de sus discípulos licenciados descubre un mínimo error matemático en los cálculos de Hawking, grita: «¡Eh!, Stephen se está haciendo viejo.» A continuación, Hawking vuelve sobre el punto en cuestión, y la tertulia puede convertirse en el momento más interesante del día. Uno de sus alumnos me dijo que esa hora con Stephen puede ser más esclarecedora que todo un semestre con otro profesor.

Es admirable que Hawking haya sido capaz de alcanzar el lugar que hoy ocupa en la ciencia. Los médicos creen que el propio hecho de su supervivencia es un milagro. Un especialista norteamericano que conoce bien la enfermedad de Hawking me dijo que cada día que vive supone un nuevo récord para la ciencia médica.

Los colegas de Hawking se niegan a aceptar este tipo de aseveraciones dramáticas. «Simplemente, Stephen es así», me decía un antiguo alumno suyo llamado Malcolm Perry, en la actualidad físico de la Universidad de Princeton. «Él no se lo toma en serio, y por tanto, nosotros tampoco.»

Gerald Wasserburg, geólogo y físico del Instituto de Tecnología de California que ha tenido ocasión de tratar a Hawking en numerosas conferencias, dice refiriéndose a él: «Es

uno de los ejemplos más conmovedores en la historia de la ciencia sobre la capacidad de la mente humana.»

De todas formas, Hawking no carece de críticas en el seno de la compacta comunidad de la ciencia física. Un importante teórico de Princeton me dijo en cierta ocasión: «Él trabaja en las mismas cosas que todos los demás. La atención se centra en él exclusivamente a causa de su condición.» Otros físicos le acusan de ser demasiado dramático y propenso a la discusión en los congresos científicos.

Sin embargo, a pesar de estos roces con sus colegas más excitables y envidiosos, el trabajo de Hawking ha sido ampliamente reconocido. Así, en 1978 recibió el Premio Albert Einstein, considerado por algunos como el más alto honor en el campo de la física teórica.

Sólo en 1982 fue nombrado doctor "honoris causa" en Notre-Dame, en la Universidad de Chicago, en la de Princeton y en la de Nueva York, y la reina Elizabeth le otorgó el título de Comandante del Imperio Británico. Los medios de comunicación le han definido con frecuencia como la respuesta a Einstein de la segunda mitad del siglo XX, pero el propio Hawking suele rechazar estas afirmaciones con uno de sus habituales comentarios: «No hay que creer todo lo que se lee.»

3. Los ojos de Galileo

Según me sugirió Stephen Hawking, Galileo Galilei, el gran astrónomo del siglo XVII, puede haber sido el mayor científico del siglo XX. «Fue el primer científico que empezó a utilizar efectivamente sus ojos, tanto en el sentido figurado como en el físico. Desde este enfoque, él fue el responsable de la era científica que hoy disfrutamos.»

Hawking continuaba diciendo: «Galileo usaba sus ojos de forma precisa. Sabía lo que veía y obraba en conformidad. Sabía cómo obtener las deducciones correctas, y cuando era consciente de estar en el buen camino, continuaba por él hasta el final.» Hawking piensa que en la actualidad, cerca de 340 años después de la muerte de Galileo, la actitud de los científicos tiene que ser más o menos la misma.

«Al igual que Galileo, los científicos actuales deben estar dispuestos a salirse de la corriente, a avanzar más allá de las ideas comúnmente aceptadas. Ese es el camino por el que se puede progresar.» Durante unos segundos rió casi en silencio. «Por supuesto, uno debe saber hallar el camino.»

Todas las semanas Hawking recibe varias cartas de personas que intentan alejarse demasiado de esa corriente, lo cual suele divertirle mucho. Una de las que me enseñó era un desordenado garabato de ecuaciones escritas en una simple hoja de papel, cuyo remitente escribía desde Michigan. «Este

hombre cree que puede haber encontrado el secreto del Universo», me dijo Hawking, «pero desde luego no es Galileo.»

Hawking consideraba a Galileo, tanto como a Einstein o a Newton, como su directo ascendiente intelectual, en el sentido de que fue el primer científico que definió la fuerza de la gravedad, la más omnipresente de la naturaleza y, paradójicamente, la más débil. Desde Galileo, la explicación original ha sido objeto de diversas correcciones, redefiniciones y ajustes. Newton reformó y perfeccionó las teorías de Galileo, y Einstein, a su vez, pulió y amplió las leyes básicas de Newton para llegar a alcanzar un conocimiento global del Universo. Ahora, Hawking y otros cosmólogos intentan hacer algo similar con la teoría de la relatividad general de Einstein, que constituye la moderna explicación de la gravedad y el principal punto de partida de la cosmología.

En 1905, cuando Einstein publicó tres artículos en el volumen 17 de la revista científica alemana *Annalen der Physik*, era imposible imaginar que sus ideas revolucionarias iban a cambiar el curso de la historia de la ciencia. El primer artículo trataba sobre mecánica estadística, y el segundo, que él juzgaba como el más importante, sobre el efecto fotoeléctrico.

El tercer artículo fue la bomba. Destinado a cambiar para siempre las concepciones sobre el tiempo y el espacio, en él se esbozaba la teoría especial de la relatividad, como luego se llamaría, y se rebatía el antiguo aforismo según el cual el espacio consistía en una sustancia etérea ocupada por materia y el tiempo se desarrollaba del mismo modo que la corriente de un río. Eran ideas que habían dominado la ciencia durante cientos de años.

Einstein afirmaba que el tiempo y el espacio debían definirse en términos utilizables para los científicos, no para los poetas o los filósofos. Tenían que ser magnitudes susceptibles de ser medidas por hombres comunes dotados de instrumentos comunes, no abstracciones inútiles desde el punto de vista científico. No había más que espacio o tiempo. Se trataba de una sencilla solución del siglo XX a un problema del XIX.

Rechazando con audacia las concepciones más prestigiosas de los dos siglos precedentes, Einstein formuló dos postulados: el primero era que, independientemente del movimiento de su fuente de procedencia, la luz siempre viaja a una velocidad constante. Esto no era nada nuevo; todos los cálculos que se habían llevado a cabo hasta la fecha habían confirmado este hecho, y era bien sabido que la luz viaja a una velocidad aproximada de 300.000 kilómetros por segundo (la cifra precisa que se utiliza en la actualidad es la de 299.789,21 km/seg). Sin embargo, ninguno de los grandes científicos experimentales de la época estaba dispuesto a ver las implicaciones de la evidencia que tenían ante sus ojos.

Nadie vio lo que vio Einstein: que la velocidad de la luz es siempre la misma, que no cambia nunca aunque se mueva su fuente de procedencia y varíe su dirección. Según escribía Einstein en su tercer artículo, este hecho se verifica independientemente de dónde provenga la luz, es decir, que la velocidad de la luz a través del espacio vacío es constante, incluso si su foco de procedencia se mueve a gran velocidad, como es el caso de las galaxias y estrellas.

Ésta era una concepción herética que parecía desafiar al sentido común. Significaba que la luz proyectada desde una estrella que se moviera hacia nosotros tendría la misma velocidad que la procedente de una estrella que se alejara. Era, y sigue siendo, una idea inquietante. Es lógico pensar que una bala disparada desde un tren en movimiento tendrá una velocidad mayor (la velocidad de la bala sumada a la del tren) que la de una bala disparada desde un punto fijo en tierra.

Este hecho, según Einstein, no se verifica en cambio en el caso de la luz: su velocidad es siempre constante, lo cual constituye un factor diferencial con respecto a la velocidad de

cualquier objeto. La velocidad de una bala, de la Luna o de un planeta se mide siempre en relación con otro objeto. En cambio, la velocidad de la luz no guarda relación con nada; siempre es igual, es una constante absoluta.

El segundo postulado decía que un observador sólo es capaz de detectar el movimiento relativo. En otras palabras, al observar el paso de un tren, una persona situada en el andén de una estación verá que es el tren lo que se mueve, y no el andén. Sin embargo, otro observador situado en el interior del tren podría imaginarse perfectamente que él y el tren están parados mientras la persona del andén y todo lo demás pasan con rapidez por la ventanilla.

El primer postulado afirma que todo movimiento es relativo, mientras que el segundo exceptúa a la luz de esa relatividad, lo cual parece una contradicción. Sin embargo, no existe ningún conflicto en el mundo de la relatividad especial, y ambos postulados han servido para derribar la concepción básica de Newton de que el tiempo es absoluto y siempre fluye, como un río, desde el pasado hasta el presente.

Para demostrar la constancia de la velocidad de la luz y la relatividad de todos los demás movimientos, Einstein proponía algunos experimentos ideales, como el siguiente: si una persona situada en el andén de una estación ve dos relámpagos en la lejanía, uno al este y otro al oeste, al detectar la luz de forma simultánea deducirá lógicamente que ambos relámpagos se produjeron al mismo tiempo. En cambio, una persona sentada en un tren que se mueve con gran rapidez desde el este hacia el oeste, al pasar frente a la estación podrá ver que el relámpago del oeste se ha producido antes.

Según Einstein, la razón de esta diferencia de percepciones es que el observador del tren estaba desplazándose hacia el relámpago del oeste, y como la velocidad de la luz es constante, el resplandor de ese relámpago llegó hasta él un poco antes que el del que se produjo al este. De esta forma, la persona situada en el andén vio dos resplandores simultáneos, mientras que el observador del tren vio uno antes y otro después. Ambas personas habían sido testigos de dos fenómenos distintos que, en realidad, eran el mismo. Del mismo modo, si los dos relámpagos se hubieran producido uno un poco después que el otro, el primero al este y el segundo al oeste, la persona situada en el tren habría detectado las dos luces de forma simultánea.

¿Cuál de los dos observadores se había equivocado? Ninguno de ellos; ambos tenían razón, en función de su punto de referencia (el tren o el andén). Mediante un razonamiento similar, Einstein demostró que el tiempo y el espacio están relacionados y que ambos son igualmente inconstantes, según el movimiento del observador. Valiéndose de una lógica y sencilla operación matemática demostró, por ejemplo, que para la persona situada en el andén, las ventanas del tren que pasaba frente a él disminuían en longitud como consecuencia de la velocidad. Si el tren hubiera acelerado hasta una velocidad próxima a la de la luz, la longitud de las ventanas se habría contraído hasta quedar en nada. Para la persona situada en el tren, las ventanas seguirían siendo siempre iguales.

Nada seguía siendo igual en el nuevo y atrevido mundo relativo de Einstein, a excepción, por supuesto, de la velocidad de la luz. Estas concepciones dieron lugar a una serie de extrañas conclusiones. Por ejemplo, si el observador del andén pudiera ver el reloj de la persona del tren, podría comprobar que sus manecillas se mueven de forma más lenta que las de su reloj, incluso aunque el tren viajara a una velocidad normal. Desde luego, esta lentitud del reloj sería tan pequeña que no podría medirse, pero a velocidades próximas a la de la luz las diferencias serían enormes.

Einstein demostró matemáticamente que un reloj situado en el interior de una nave espacial que se alejara a una velocidad de 260.000 kilómetros por segundo (cerca del 86% de

la velocidad de la luz), si pudiera ser visto por un observador desde la Tierra, parecería moverse a la mitad de su velocidad normal. Del mismo modo, se observaría que la masa de la nave se habría duplicado y que sus dimensiones se habrían contraído hasta la mitad de su tamaño original. Para un astronauta situado en el interior de la nave, los cambios no se habrían producido en ésta, sino en la Tierra, donde el tiempo parecería ir más despacio.

Al afirmar que el tiempo se mide de forma diferente en función del movimiento relativo de los objetos y personas entre sí, Einstein abolía el tiempo absoluto para siempre (la palabra "siempre" era otra idea que iba a dejar de tener significado en el universo relativo). Posteriormente, Einstein demostró que un astronauta que viajara a una velocidad próxima a la de la luz envejecería más despacio que un hermano gemelo suyo que se hubiera quedado en la Tierra.

En su cuarto y último artículo de 1905, Einstein formuló el que quizá fue su descubrimiento más atrevido. Después de haber derribado las concepciones tradicionales sobre el espacio y el tiempo, ahora iba a hacer lo mismo con las de la masa y la energía. Antes de Einstein, la materia y la energía se consideraban cosas separadas y distintas. La intuición nos dice, como les decía a los físicos anteriores a Einstein, que una pelota y la energía necesaria para lanzarla no son la misma cosa. Partiendo de los postulados de la relatividad especial, Einstein encontró que tal distinción no era válida.

A partir de las fórmulas matemáticas de la teoría especial de la relatividad general y de algunas de las ideas de su artículo sobre el efecto fotoeléctrico, Einstein llegó a la conclusión de que si un objeto emite energía en forma de luz, su masa se reducirá en función de la energía dividida por la velocidad de la luz al cuadrado (es decir, $m = \frac{E}{c^2}$).

Partiendo de esta fórmula sólo quedaba dar un sencillo

paso algebraico para llegar a la ecuación más famosa de la historia: $E = mc^2$, que fue publicada en 1907.

Einstein demostraba que la masa y la energía no sólo eran equivalentes, sino que eran también intercambiables. De ello podían deducirse consecuencias extraordinarias, como por ejemplo, que una pequeña porción de materia podría convertirse, en las condiciones adecuadas, en una temible cantidad de energía equivalente al poder explosivo de miles de toneladas de TNT.

La veracidad de la relatividad especial y de la posibilidad de intercambio entre la masa y la energía se ha demostrado en múltiples ocasiones en los aceleradores de partículas, enormes desintegradores atómicos utilizados en la actualidad por los físicos para explorar el núcleo del átomo. Así, en el Fermi National Accelerator Laboratory se ha comprobado que la masa de los protones acelerados a través de un tubo de 6,5 km aumenta varios miles de veces al alcanzar una velocidad cercana a la de la luz.

Al elaborar su teoría de la relatividad especial y los postulados, Einstein estaba formulando únicamente una serie de leyes nuevas sobre la medición del espacio y el tiempo entre observadores que se movían a una velocidad uniforme, sin considerar las posibilidades de la aceleración y la desaceleración o las del movimiento curvo (como el de una órbita planetaria). Einstein comprendió que tenía que resolver las complicadas cuestiones del movimiento acelerado.

Uno de los problemas más importantes del movimiento no uniforme se manifiesta en la fuerza de la gravedad, por cuanto que ésta atrae a los objetos con una velocidad acelerada. El hecho más notable que habían observado Newton y Galileo en relación con la gravedad era que esta fuerza parecía actuar de igual forma sobre todos los cuerpos, independientemente de su peso. En sus famosos (aunque probablemente falsos) experimentos de la Torre de Pisa, Galileo

demostró que, al soltar desde arriba dos objetos de diferentes masas, ambos llegaban al suelo al mismo tiempo. Si se producía alguna diferencia, ello se debía a la resistencia del aire (una bala de cañón, por ejemplo, llegaba antes al suelo que una pluma).

Galileo y Newton entendieron la gravedad como una fuerza excepcional de la naturaleza: una fuerza específica de la Tierra o de otros cuerpos celestes. Einstein la entendió como un fenómeno mucho más amplio.

Supongamos, decía Einstein, que un científico se encuentra en un ascensor situado en el interior de una nave espacial alejada de la influencia de la gravitación terrestre. Imaginemos que el ascensor sube hacia arriba con una aceleración de 9,8 metros por segundo en cada segundo. Esta es la aceleración exacta con que un objeto (como una bala de cañón arrojada desde una torre) es atraído hacia la Tierra por la fuerza de la gravedad. En el ascensor de la astronave, alejada de la gravedad terrestre, los pies del científico presionan el suelo en la misma medida en que su cuerpo se opone a la aceleración ascendente, y si suelta una piedra, ésta caerá al suelo del mismo modo que lo haría en la Tierra.

El científico no puede decir si la fuerza que le atrae hacia abajo es motivada por la gravedad o por la inercia de su cuerpo al oponerse a la aceleración hacia arriba del ascensor. Según Einstein, esto significa que no hay ninguna diferencia entre la aceleración causada por la gravedad y la aceleración motivada por otros medios. Era el principio de equivalencia, según el cual un campo gravitacional tiene una "existencia relativa".

Si Galileo hubiera saltado desde la Torre de Pisa y a continuación hubiera soltado la piedra en el aire, tanto él como la piedra se habrían encontrado en una situación de caída libre. Galileo habría visto la piedra en un estado de reposo, y con los efectos de la gravedad momentáneamente suspendidos, él mismo se habría considerado también en estado de reposo durante unos segundos.

¿Qué *es* entonces la gravedad? Einstein se valió de las ideas de la relatividad especial y de otras nuevas para describirla de una forma única, demostrando que la gravedad no era realmente una fuerza en el sentido usual del término. Einstein añadió a la relatividad especial un tipo distinto de geometría, al comprobar que la vieja geometría euclidiana era demasiado limitada para su nueva forma de entender el Universo.

Marcel Grossman, un viejo amigo cuyos apuntes le habían ayudado a aprobar un importante examen en la época en que ambos eran estudiantes en un instituto suizo, le indicó el camino a seguir. Existía un tipo de geometría no euclidiana que había sido desarrollada por un matemático alemán llamado Bernhard Riemann. Era el instrumento que Einstein necesitaba: la geometría del espacio curvo.

Pero, ¿qué tienen que ver el espacio curvo y los ascensores acelerados con la fuerza de la gravedad? Imaginemos de nuevo, decía Einstein, que el ascensor de la nave espacial en el que se encuentra el científico, acelera de tal manera su movimiento que empieza a aproximarse a la velocidad de la luz. En tal caso, si una de las paredes del ascensor tuviera un agujero por el que entra un rayo de luz, el científico podría ver que dicho rayo se inclina ligeramente hacia abajo formando un arco, e incidiendo en la pared contraria a un nivel inferior al del otro lado.

Según la primera formulación de Einstein, la causa de este hecho es que, en ciertas condiciones, la luz y la masa son equivalentes. Al ser energía, la luz tiene una masa, y todo lo que tiene masa es atraído por la gravedad. Puesto que la gravedad no es sino una forma de aceleración, la luz y el científico del ascensor acelerado se ven igualmente afectados por dicha aceleración, y ambos son atraídos hacia el suelo.

Por el mismo razonamiento, según Einstein, si un rayo de luz pasa cerca de un objeto pesado, como un planeta, la gravedad desviará también la trayectoria de la luz hacia el planeta.

Einstein reunió todos estos conceptos en diez formulaciones matemáticas o ecuaciones específicas que se publicaron bajo la denominación de teoría general de la relatividad en 1916. Era una teoría más revolucionaria incluso que la de la relatividad especial, pues prácticamente no tenía ningún antecedente teórico en la historia.

El aspecto más destacable de la relatividad general es que con ella Einstein había dado al traste con la idea de la gravedad como fuerza. De hecho, para él no existía la fuerza de la gravedad; lo que existía era la geometría del Universo (la geometría curva aportada por Riemann), de la que depende la fuerza a la que llamamos gravedad. Einstein denominó «continuo espacio tiempo» al espacio curvo que había concebido.

Este espacio funcionaba como una cama elástica. Si situamos en ella una bala de cañón, produciremos una gran deformación en su superficie. Una naranja producirá una deformación más pequeña y tenderá a rodar hasta el punto más hundido. En el espacio, las estrellas y los planetas producen el mismo efecto que las esferas en la cama elástica; los cuerpos celestes causan una deformación en el espacio que los rodea, alterando la geometría del mismo. Los objetos más grandes situados en este espacio curvo y deformado tienden, al igual que la bala de cañón, a atraer a otros objetos menos voluminosos hacia ellos.

La teoría de la relatividad general se distanciaba mucho del pensamiento convencional de la época. Constituía una física totalmente nueva, una forma distinta de mirar al Universo, y muchos se negaron a creer en ella.

Einstein conocía la existencia de dos fenómenos naturales que podrían demostrar la veracidad de sus ideas sobre el espacio curvo. El primero de ellos estaba relacionado con la órbita de Mercurio, la cual, según las observaciones tomadas a lo largo del siglo anterior, no se ajustaba a la órbita elíptica definida por la física de Newton; su órbita mostraba una desviación de 43 segundos de circunferencia cuando el planeta se encontraba en el punto más cercano al Sol. Nadie había podido explicar esta diferencia, pequeña pero medible con los instrumentos técnicos del siglo XIX. Cuando las ecuaciones específicas de Einstein se aplicaron a la órbita de Mercurio, éstas pronosticaron precisamente una diferencia de 43 segundos de circunferencia.

La segunda prueba para la teoría era más difícil. Las ecuaciones de Einstein demostraban que la luz de una estrella lejana debería desviarse ligeramente al pasar junto al campo gravitacional del Sol (igual que sucedía con el rayo de luz en el ascensor de la nave espacial). Según las ecuaciones, la desviación debía ser de 1,75 segundos. El único momento en que podría comprobarse esta hipótesis era durante un eclipse total de Sol, ya que de otro modo, la luz de cualquier estrella alineada con el Sol sería anulada por el brillo de éste.

El 29 de mayo de 1919, tres años después de la publicación de la teoría general de la relatividad, se produjo un eclipse total en el hemisferio sur. La Royal Society organizó una expedición científica con destino a Príncipe, una isla situada frente a las costas occidentales de África. Durante el eclipse, el físico británico Arthur Eddington detectó una desviación en la luz estelar que coincidía casi exactamente con los cálculos de Einstein. Cuando fue informado de la confirmación de sus teorías en Berlín, Einstein declaró que nunca había dudado de los resultados. A continuación le preguntaron sobre cuál habría sido su postura si las mediciones no hubieran confirmado la relatividad general; su respuesta fue: «En ese caso, habría sentido lástima de la Providencia, por haberse equivocado.»

Con estas observaciones, que parecían demostrar la relatividad general y que constituían las primeras confirmaciones de que el Universo funcionaba casi exactamente como había predicho la teoría de Einstein, nacía la moderna cosmología teórica.

Todas las grandes reformulaciones de la visión conceptual del hombre sobre el Universo se han visto precedidas por un período en el que las viejas concepciones estaban comenzando a desmoronarse. Se descubren nuevas realidades que no encajan con los esquemas tradicionales, y la antigua visión conceptual entra en un proceso de descomposición. Cuando Einstein saltó a la palestra, la ciencia se encontraba a punto de derrumbarse. Las numerosas grietas del edificio newtoniano requerían la formulación de una nueva y distinta visión de las cosas. Aún no sabemos con certeza si en la actualidad se hace también necesaria una nueva visión conceptual frente a las grietas del monolito de la física del siglo XX.

Hawking, nacido en un universo totalmente descrito y aceptado según la teoría de la relatividad, pertenece a la segunda generación de científicos formados en los dogmas einsteinianos. Durante el siglo XX el progreso científico ha sido tan rápido que Einstein se ha convertido ya en una figura casi sagrada. Es posible que la visión einsteiniana del Universo haya comenzado a derrumbarse y que nos encontremos ante el umbral de una nueva era de la ciencia. Hawking se niega a responder a este interrogante: «Nadie puede predecir lo que va a ocurrir. Uno de los encantos de lo que no se ha descubierto es precisamente que aún no se ha descubierto.»

4. La reconciliación con Einstein

Einstein dijo o escribió en varias ocasiones que «Dios no juega a los dados con el Universo», lo que suponía una declaración de su permanente conflicto con la mecánica cuántica, el sistema matemático desarrollado durante las décadas de 1920 y 1930 para explicar el comportamiento de las partículas subatómicas. Algunas décadas más tarde Stephen Hawking replicaba: «Dios no sólo juega a los dados, sino que a veces los arroja a donde no pueden verse.» No era una observación tan expresiva como la de Einstein, pero indicaba una importante constatación: el tiempo y el progreso del conocimiento habían sobrepasado finalmente a Einstein. *

Hawking tiene en su estudio una pequeña colección de fotografías y pósters de Einstein. De vez en cuando las imágenes viejas son reemplazadas por nuevas reproducciones. Sin embargo, en mis entrevistas con Hawking, el único comentario que hizo sobre Einstein fue: «Bueno, ha sido un gran físico.»

Tras la comprobación de la relatividad general, Einstein se hizo famoso en todo el mundo. Fue recibido por reyes, los

* El comentario sobre los dados arrojados a donde no pueden verse aluden a la posibilidad de que se encuentren en el interior de un agujero negro.

periódicos y las revistas se agolpaban ante su puerta para entrevistarle y se vendían libros de divulgación que intentaban explicar los secretos de la relatividad general. También hubo algunas resistencias frente a su teoría. Algunas personas se negaban a creer que un solo hombre pudiera hacer una nueva definición del Universo entero utilizando únicamente una serie de jeroglíficos matemáticos.

Ignorando las adulaciones y las críticas, Einstein continuó avanzando en su trabajo. Habría sido imposible volver a lograr una hazaña tan revolucionaria como la formulación de la relatividad general, pero, en cualquier caso, era necesario ampliar la teoría. Estaba seguro de que sus ecuaciones, que describían la geometría del espacio-tiempo, podrían aplicarse a la geometría de la totalidad del espacio-tiempo, es decir, al Universo desde su inicio hasta su final. Al año siguiente, en 1917, Einstein publicó un artículo en el que, más que en ninguno de los anteriores, se establecían las bases de la moderna cosmología: el estudio del origen, la evolución y la configuración del Universo.

Era un texto muy notable. En él se exponía el principio del rayo láser cuarenta años antes de que se llegara a producir el primero, lo cual constituía por sí mismo un sorprendente logro. Sin embargo, lo más importante fue la descripción del modo en que las ecuaciones de la relatividad general podrían explicar el comportamiento de grandes masas de materia en el Universo, a lo largo de grandes períodos de tiempo. En seguida tropezó con dificultades.

El problema era que cualquier interpretación consecuente y sencilla de sus ecuaciones indicaba que el Universo era inestable, y que incluso podía encontrarse en un proceso de expansión. El astrónomo holandés Willem de Sitter, entre otros, había derivado de dichas ecuaciones la conclusión de que el Universo no era estático; podía encontrarse en expansión o en contracción, pero no en reposo. Einstein se negó

a admitirlo. Quería que sus ecuaciones sirvieran para demostrar que el Universo era tal y como lo habían descrito la mayoría de los astrónomos: estable e inmutable, isótropo (igual en todas direcciones) y homogéneo (igual en cada uno de sus puntos).

Einstein encontró una curiosa solución para el problema. Para conseguir que la relatividad general se ajustara a este modelo del Universo, alteró sus ecuaciones añadiendo a ellas un número al que llamó constante cosmológica; se trataba, según sus propias palabras, de una «insignificante modificación.»

El problema inmediato que se planteaba en relación con la constante cosmológica era que la relatividad general constituía una teoría tan completa en sí misma que no necesitaba de ninguna constante universal. Los "signos delta", con los que se expresaba esta constante, eran por tanto absolutamente innecesarios. El propio Einstein se había dado cuenta de ello, y en la última frase del artículo de 1917 declaraba que «ese signo [el delta] sólo es necesario al efecto de hacer posible una distribución cuasi-estática de la materia, como en el caso de las pequeñas velocidades de las estrellas.»

En 1922 un matemático ruso, Alexander Friedman, resolvió de dos formas distintas las ecuaciones de Einstein, una con la constante cosmológica y otra sin ella. Al igual que le había ocurrido a Einstein, al utilizar la constante cosmológica su solución indicaba la existencia de un universo estático que siempre permanecía igual. La segunda solución de Friedman, más atrevida, prescindía de los signos delta y esbozaba el primer modelo de un Universo en expansión, en realidad dos modelos: era necesario determinar cuál era el correcto, pues cada uno de ellos proponía una visión distinta del destino final del Universo.

Los dos modelos de Friedman, en los que se formula la hipótesis de la expansión del Universo, constituyen de hecho

la base de la actual cosmología. En el primer modelo la densidad de la materia nunca llega a alcanzar una cantidad crítica, lo que significa que el Universo es infinito y puede expandirse eternamente. En el segundo (el aceptado por la mayoría de los modernos cosmólogos), la densidad es mayor que el nivel crítico, por lo que la expansión del Universo tendrá que cesar en algún momento. Es un Universo finito, pero ilimitado, lo que significa que, si pudiéramos avanzar continuamente en línea recta por el espacio, al final regresaríamos al punto de partida sin haber modificado la dirección.

Es una extraña concepción que tenemos que aceptar con la misma naturalidad con la que aceptamos la noción de que un huevo se fríe al echarlo a una sartén caliente. Hawking piensa que este Universo curvado sobre sí mismo es como un gigantesco agujero negro, que también se curva en torno a sí mismo. Al menos, dice, las descripciones matemáticas de ambas realidades son similares.

«Otra forma en la que se puede imaginar este modelo de universo», dice Hawking, «es como un gigantesco globo que se hincha.»* Los puntos del globo serían las galaxias.

En 1922 Einstein publicó una crítica matemática del trabajo de Friedman. Poco después abandonó el tema y se olvidó totalmente de él durante casi una década.

Por aquella misma época una serie de telescopios cada vez más grandes construidos al oeste de Estados Unidos estaban viendo en los cielos lo que Friedman había predicho en sus cálculos. En 1908 se había construido un reflector de 150 cm en Mount Wilson, en California, y en 1917 se instaló un telescopio de 250 cm en el mismo observatorio. Edwin Hubble, que en su juventud había sido campeón de boxeo amateur, comenzó a trabajar en Mount Wilson en 1919, y en

* A medida que el globo se va hinchando, sus puntos se van separando.

1923 llevó a cabo la primera estimación de la distancia entre nuestra galaxia, la Vía Láctea, y Andrómeda, la galaxia más próxima a nosotros.

Hubble demostró también que Andrómeda tenía aproximadamente el mismo tamaño que la Vía Láctea, lo que constituía la primera evidencia de que otras partes del Universo eran iguales a la nuestra. Durante la década de 1920 Hubble descubrió que las galaxias lejanas se distribuían de manera uniforme en el espacio, y lo que es más importante, confirmó que dichas galaxias se separan entre sí como si fueran perdigones disparados desde una escopeta.

En 1929, Hubble anunció que, según sus comprobaciones, las galaxias se separaban entre sí a una velocidad directamente proporcional a su distancia de la Vía Láctea. Se trataba de la primera prueba directa de la expansión del Universo; la ley de Hubble, como se la llamó, convenció a la mayoría de los científicos de que la interpretación de Friedman sobre Einstein era más correcta que la propia interpretación de Einstein sobre sus teorías. Este último tuvo que admitir que la constante cosmológica constituía el error más grave de su carrera científica.

Antes de las observaciones de Hubble, los cálculos de Friedman apenas habían sido algo más que un juguete en manos de los teóricos. Sin embargo, al combinarse con la ley de Hubble, estos cálculos sirvieron para establecer lo que hoy se conoce como el principio cosmológico. En esencia, este principio afirma que el Universo es más o menos igual en todas direcciones. Cualquiera que sea el punto de observación que elijamos en el conjunto del Cosmos, lo que veremos será aproximadamente igual en todos los sitios. Desde la década de 1930, todas las observaciones realizadas han confirmado la expansión del Universo, aunque la validez del principio cosmológico no se ha comprobado de forma definitiva mediante los datos astronómicos.

«En realidad», me decía Hawking cuando hablábamos de este tema, «no existe una plena seguridad de que el Universo sea igual en todos sus puntos. Podemos imaginar una imagen del Universo en la cual éste tuviera distintas ramas. Nosotros nos hallaríamos en una rama que no nos permitiría ver el resto del Universo. De hecho, existe una cierta probabilidad de que el Universo tenga muchas formas distintas.»

En cualquier caso, la relatividad general complementada con la interpretación de Friedman y las observaciones de Hubble, proporcionó por vez primera una completa (aunque no totalmente segura) imagen del Universo. Sin embargo, hasta el momento en que Hawking y Roger Penrose hicieron su aparición en la escena científica, varias décadas después, los cosmólogos no empezaron a comprender la totalidad de las implicaciones que tenía realmente esa imagen.

«Uno de los aspectos de las soluciones de Friedman que no fueron tomados demasiado en serio en su momento», me decía Hawking, «era que dichas soluciones indicaban que en el pasado existió un período singular en el que toda la materia del Universo estuvo concentrada en un solo punto.» Ese punto se conoce como "singularidad". "La mayor parte de los especialistas coincidían entonces en pensar que las condiciones del Universo real nunca podían haber sido tan extremas."

Hawking me dijo que en la época en que él y Penrose concentraron su atención en el problema de la interpretación relativista del origen del Universo, el modelo de Friedman proporcionaba una visión bastante satisfactoria de lo que había sucedido en el Cosmos poco antes de los cien primeros segundos de su existencia. «Naturalmente», me decía, «nosotros estábamos ansiosos por descubrir lo que había sucedido antes de eso.»

El problema de los modelos de Friedman, a pesar de su carácter innovador, era que el Universo real contiene irregularidades. «Al retroceder en el tiempo», decía Hawking, «esas

irregularidades podrían hacerse más grandes y originar la separación generalizada de las partículas individuales entre sí, en una especie de salto en el que desaparecería la singularidad. En tal caso, los puntos se separarían entre sí durante la contracción y a continuación el Universo volvería a expandirse sin alcanzar nunca la singularidad.»

«El resultado es que nadie se tomó muy en serio la interpretación de lo que sucedió durante la creación del Universo según el modelo de Friedman», me decía Hawking. «De hecho, la mayoría de los científicos pensaba que no se había producido una auténtica creación. Nosotros demostramos que estaban equivocados.»

Al deducir una contracción teórica del Universo a partir del modelo de la expansión de Friedman (retrocediendo en el tiempo) los físicos intentaban descubrir lo que había sucedido en el auténtico comienzo del Cosmos. Lo que querían demostrar en primer lugar era que el Universo, tal como indicaba el modelo de Friedman, había tenido un comienzo en el que toda la materia estaba concentrada en un punto único, y que este punto se manifestó y explotó en un Big Bang del que surgió nuestro Universo, el espacio y el tiempo. Hawking y su colega Roger Penrose eran los que iban a llevar a cabo esta hazaña.

Penrose, joven matemático y físico teórico, se encontraba entonces en el Birkbeck College de la Universidad de Londres, y estaba considerado ya como uno de los principales matemáticos del mundo. Era un maestro en la formulación de problemas y acertijos geométricos y matemáticos, y había asesorado al dibujante holandés M. C. Escher en varias de sus creaciones. Las cualidades de Penrose no eran casuales; su padre fue un conocido genetista e inventor de acertijos matemáticos, uno de sus hermanos había sido campeón de ajedrez de Gran Bretaña en diez ocasiones, y su tío fue un importante pintor surrealista, amigo y biógrafo de Picasso.

«La primera cuestión importante en la que nos pusimos a trabajar fue la del hipotético principio y fin del tiempo», me dijo Hawking. «En la época en que comenzamos a estudiar el problema, en 1962, la opinión general era que nunca había existido tal principio.»

Uno de los modelos observables que suelen ser más buscados por los teóricos del Big Bang es el de las estrellas en contracción. Estas estrellas, al contraerse sobre sí mismas debido a su propio peso, pueden producir finalmente un agujero negro, en cuyo centro se encuentra la problemática "singularidad". Y lo que es más importante, estas estrellas presentan algunas de las características (a la inversa) de lo que sería un universo en expansión.

La historia de cualquier estrella (tanto si tiene un tamaño medio, como el del Sol, o si es tan grande como Antares, cuyo diámetro es igual al de la órbita terrestre), constituye esencialmente un tira y afloja entre la poderosa fuerza, dirigida hacia el exterior, de su calor y su radiación (producidos por las interacciones que se generan en los átomos estelares), y la intensa fuerza hacia el interior motivada por la gravedad. Si una estrella es demasiado pesada, ninguna de las otras tres fuerzas que actúan en el Universo (la interacción nuclear fuerte, la interacción nuclear débil y el electromagnetismo), podrá resistir la atracción de la gravedad ejercida sobre la propia materia de la estrella, que comenzaría a contraerse sobre sí misma.

¿Qué es lo que impide que esta contracción continúe indefinidamente? ¿Puede una estrella aglomerarse sobre sí misma hasta formar una partícula infinitesimal en la que se centre toda su materia constituyendo un punto de infinita densidad? Al imaginar una estrella en contracción indefinida, los físicos eran incapaces de determinar lo que sucedería cuando dicha estrella se aglutinara hasta llegar al punto conocido como singularidad. La singularidad es el final del camino, un lugar en el que el espacio y el tiempo simplemente desaparecen. «En la singularidad, los conceptos normales de espacio y tiempo se diluyen», me decía Hawking. «Con las ecuaciones pasa lo mismo.»

Muchos teóricos pensaron que las singularidades no podían ser otra cosa que meras abstracciones matemáticas. Penrose consiguió un brillante logro matemático al demostrar que la posibilidad de una estrella en contracción sin fin no era un simple juego teórico, y que, finalmente, dicha estrella terminaría constituyendo una singularidad real y física. Penrose demostró que el espacio y el tiempo podían tener un final físico, no metafórico.

En 1965 Hawking, atraído por esta comprobación de la singularidad, comenzó a trabajar en colaboración con Penrose. A lo largo de los tres años siguientes ambos científicos desarrollaron varias teorías clave sobre la estructura del espacio y el tiempo y de las singularidades, indicando que el Universo comenzó a partir de una singularidad.

Sin embargo, demostrar que el Universo había comenzado a partir de una singularidad de densidad infinita no era una tarea fácil. «Por supuesto, éste era el punto en donde fracasaban todas nuestras ecuaciones», recordaba Hawking. «La mayoría de los científicos de aquella época pensaban que las soluciones de entonces a las ecuaciones de Einstein no eran realistas, pues en ellas se representaba un Universo demasiado uniforme e isótropo.»

«La mayoría de las personas que trabajaban en este problema creían que la solución más cercana a la verdad tendría que ser complicada y tener un gran número de irregularidades importantes. Nadie quería creer que la verdad podía ser tan sencilla como era en realidad», decía Hawking sonriendo.

Como la expansión del Universo se había reconstruido a la inversa, a partir de una teórica contracción, uno de los problemas con que tuvieron que enfrentarse los físicos fue el de

la posibilidad de que las partículas, dotadas de un movimiento irregular y casual, pudieran anularse entre sí. Eso era lo que pensaba un grupo de teóricos rusos en 1963, cuando propusieron la teoría de las fases de alternancia, contracción y expansión durante el Big Bang, las cuales habrían evitado que las partículas chocasen entre sí.

Hawking reía al contármelo. «Mi primera investigación importante estaba encaminada a demostrar que estos científicos estaban equivocados.» Entre 1965 y 1968, él y Penrose trabajaron en el problema. Hawking me explicó cuáles eran las ideas de ambos al respecto: «La nueva técnica matemática que desarrollamos constituía en realidad un análisis del modo en que se pueden relacionar causalmente entre sí los puntos del espacio-tiempo. Partimos de la base de que, según la relatividad general, ninguna sustancia puede viajar más deprisa que la luz. Ello explica que dos hechos sólo puedan relacionarse si la vinculación entre ambos se produce a una velocidad igual o menor que la de la luz.»

Esto significaba que Hawking y Penrose no necesitaban explicar lo que les sucedió a las partículas individuales en el momento del Big Bang, como habían intentado hacer todos los demás. «En realidad, lo que descubrimos era que se podía utilizar un gran número de argumentos para demostrar que había existido una singularidad en el inicio del Universo, que podía abordarse el tema de una forma mucho más sencilla. De todo ello se deducía que el tiempo había tenido un comienzo.»

Hawking y Penrose continuaron trabajando para demostrar no sólo que el Universo podía haber comenzado a partir de una singularidad, sino que verdaderamente *tenía* que haberse originado a partir de ella.

«Lo que hicimos fue demostrar que la solución más sencilla de la relatividad general era la correcta», decía Hawking. «De hecho, teniendo en cuenta la complejidad global del Universo, resulta verdaderamente sorprendente que la solución correcta de la relatividad general sea también la más sencilla.»

La interpretación que dio Friedman sobre la relatividad general de Einstein había proporcionado la primera imagen de un Universo completo. Hawking y Penrose añadieron a este esbozo general una interpretación relativista del Universo en sus comienzos, la cual requería la existencia de, por lo menos, una singularidad física.

La singularidad que descubrieron Hawking y Penrose con sus cálculos, aunque ciertamente era real y física, constituía una realidad matemática del espacio-tiempo en la que se diluía el comportamiento físico normal. Dichos cálculos habían demostrado que un Universo relativo que tuviera unas auténticas características físicas debía tener esa singularidad, de lo cual se derivaba una clara consecuencia: no podía entenderse el Universo a partir de la relatividad general si en sus comienzos no se había poducido un Big Bang o algo muy parecido. El análisis teórico del Big Bang (el primero que se ha hecho) constituye uno de los pasos más grandes que se han dado en la cosmología desde que Friedman aplicó su sistema matemático a la relatividad general.

En aquella misma época (durante los años sesenta), los descubrimientos astronómicos confirmaron el trabajo teórico de Friedman. El más importante de estos hallazgos posteriores a los de Hubble fue el de las radiaciones de fondo que se distribuyen de manera uniforme a través del Universo; Arnold Penzias y Robert Wilson fueron los primeros que detectaron, sin darse cuenta, estas radiaciones en 1964. «El fenómeno se interpretó correctamente como un vestigio del Big Bang», decía Hawking. «Antes de esa fecha, en 1948, había sido ya predicho por George Gamow y sus colegas, pero en aquella época nadie se tomó demasiado en serio dicha predicción, en parte debido a los problemas derivados del modelo de Friedman.»

Otro hallazgo de enorme importancia fue el descubrimiento de que el 25% de la masa de toda la materia del Universo está compuesta por helio, mientras que el otro 75% es nitrógeno en su mayor parte. "Los cálculos de Gamow y otros estudios posteriores afirmaban que unos cien segundos después de que se produjera la singularidad, la cuarta parte de todos los protones y neutrones que se habían creado originariamente se transformaron en helio y en una pequeña cantidad de deuterio. Resultaba difícil explicar la gran cantidad de helio existente en el Universo de otra forma que no fuera la que indicaban los cálculos de Gamow. Por eso, éste fue un hallazgo muy satisfactorio para los teóricos, casi tanto como el descubrimiento de la radiación de fondo desprendida durante la fase densa del Universo".

Estos descubrimientos confirmaron que el trabajo de los teóricos había demostrado el hecho de que el Universo se originó como consecuencia de una explosión muy caliente. De esta forma se comprobaba que los teóricos eran capaces de hacer algo más que meras especulaciones, que podían formular conclusiones válidas sobre el nacimiento y la evolución del Universo. Hawking y Penrose, que fueron los que elaboraron estas hipótesis, explicaban de esta forma que el Big Bang no sólo era efectiva y teóricamente posible, sino que incluso era necesario.

Paradójicamente, Einstein había llegado a una conclusión similar años antes, a pesar del gran error de la constante cosmológica. Al introducir (con la ayuda indirecta de Friedman) las famosas constantes delta, comprendió que según la teoría de la relatividad general el Universo tuvo que tener al menos una singularidad a lo largo de su historia. Sin embargo, Einstein se olvidó de esta singularidad en el momento en que más la necesitaban las ecuaciones teóricas.

Según la versión más aceptada sobre el Big Bang, hace diez o quince mil millones de años toda la materia del Universo

se hallaba concentrada en una bola de fuego primordial formada por gases extremadamente calientes y comprimidos.

«El mayor error a la hora de entender el Big Bang es pensar que éste constituyó el origen de una masa material en algún lugar del espacio vacío», decía Hawking durante nuestra conversación sobre los primeros momentos del Universo. «No fue sólo materia lo que se creó durante el Big Bang; lo que se creó fue el espacio y el tiempo. Del mismo modo que el tiempo tuvo un comienzo, también lo tuvo el espacio.»

A continuación le pregunté si de verdad creía que el tiempo hubiera comenzado efectivamente con el Big Bang. «Cuando se retrocede a los inicios del Universo», me respondió, «el concepto ordinario de tiempo se desvanece. Es imposible concebir la idea de retroceder indefinidamente en el tiempo. Existe un momento próximo al Big Bang en el que ya no se puede definir el tiempo. En este sentido es en el que puede decirse que el tiempo tuvo un comienzo.»

La física de la relatividad general se utilizó para demostrar la existencia de la singularidad en el comienzo del Universo. «El problema de este enfoque», decía Hawking, «es que la relatividad general, que se empleó para descubrir la singularidad originaria, es una teoría demasiado clásica. De hecho la relatividad general no tiene ninguna utilidad para explicar el comportamiento de las partículas subatómicas que se crearon como consecuencia del Big Bang.»

El movimiento y la masa de las partículas subatómicas se describen mediante la mecánica cuántica, un sistema matemático totalmente ajeno a la relatividad general que fue desarrollado durante las décadas de 1920 y 1930. Este sistema explica las interacciones que se producen a nivel subatómico, y su planteamiento central es el principio de incertidumbre, formulado por vez primera en 1927 por el físico alemán Werner Heisenberg.

El principio de incertidumbre afirma que ciertos pares de

cantidades, tales como la posición y el momento de un electrón, no pueden medirse de forma simultánea. Esto significa que el electrón no es una porción de materia objetiva, absoluta y determinable, como lo describía la física clásica, sino una especie de entidad objetiva que embadurna en algún sentido el espacio exterior del núcleo.

El principio de incertidumbre hace que la mecánica cuántica se distinga del resto de la física al explicar matemáticamente el hecho de que las partículas atómicas y nucleares se encuentren distribuidas de una forma incierta y aleatoria. La localización de cualquier partícula en un instante determinado sólo puede describirse utilizando un sistema de probabilidades y estadísticas.

Esta imposibilidad de predicción que caracteriza a la mecánica cuántica fue lo que impidió a Einstein su aceptación, pues se obstinaba en mantener la visión de un Universo ordenado y predecible, cuyo reflejo perfecto era la relatividad general. Para Einstein, el sistema cuántico no tenía ninguna posibilidad matemática o filosófica de existir en el Universo de la relatividad general. Los físicos actuales, en cambio, consideran que dicho sistema tiene tanta importancia como la relatividad general. Al igual que la teoría de Einstein, la mecánica cuántica ha sido comprobada en todos los experimentos que se han ideado al efecto. Estos experimentos se han llevado a cabo en aceleradores de partículas que separan los elementos del átomo con el fin de descubrir su composición, en un proceso que algunos teóricos han comparado cáusticamente con el de abrir un reloj y desmontar sus piezas para ver cómo deja de funcionar.

La mecánica cuántica parece sugerir que el mundo subatómico (e incluso el mundo situado más allá del átomo) no tiene una estructura independiente del conjunto de realidades que pueden ser definidas por la mente humana (esta visión del Universo se asemeja en algunos puntos con la de la filosofía oriental, lo que ha dado lugar, para consternación de Hawking, al surgimiento de una abundante literatura popular que intenta unir la física cuántica con el misticismo oriental, en títulos tales como *The Tao of Physics*, de Fritjof Capra, o *Mysticism and the New Physics*, de Michael Talbot). Los físicos se han mostrado incapaces de conciliar este sistema con la visión del Universo propuesta por la relatividad general. La relatividad general permite la existencia de un punto perfecto como la singularidad en el comienzo del tiempo, posibilidad que, en cambio, no es admitida por la mecánica cuántica, debido a que según este sistema no puede definirse simultáneamente la localización, la velocidad y el tamaño de ninguna partícula única o singularidad.

En última instancia tendremos que valernos de la mecánica cuántica si queremos comprender el funcionamiento del Universo infinitesimal en sus comienzos. La única esperanza que tienen los teóricos de reconciliar estas dos áreas aparentemente irreconciliables de la física es la de encontrar una teoría del campo unificado que sirva para explicar el funcionamiento del Universo completo.

Los estudios de Hawking indican que la formulación de esta teoría conllevará también una profunda comprensión de los agujeros negros, cuya inhospitalaria y lúgubre estructura contiene importantes similitudes matemáticas con el comienzo del tiempo.

5. Al encuentro de los agujeros negros

La publicación de un artículo divulgativo sobre los agujeros negros en la revista *Time* el 4 de septiembre de 1978 fue la culminación de la curiosidad popular que se había despertado en relación con estos ocultos y, con frecuencia, poco comprendidos objetos. En un recuadro del artículo se hablaba de forma destacada de Hawking, a quien se definía como "uno de los principales científicos teóricos del siglo, quizá equiparable a Einstein".

Hawking se echó a reír cuando le pregunté su opinión sobre esta comparación. «Nunca es correcto comparar a dos personas distintas», dijo, «y mucho menos si se trata de dos físicos.» Y concluyó añadiendo: «Las personas no somos cuantificables.»

Hawking es consciente de ser una autoridad en el tema de los agujeros negros, y aunque en la actualidad su atención se halla centrada en otros asuntos (principalmente en el estudio del comienzo del Universo), continúa contemplando a los agujeros negros con una mezcla de respeto y emoción y siempre está dispuesto a hablar de ellos.

«Desde allí no se puede regresar», dijo sonriendo cuando le pregunté cómo sería un encuentro con un agujero negro. A continuación, con un ligero encogimiento de sus frágiles hombros, me preguntó hasta dónde quería profundizar en las

matemáticas cuando empezara a explicarme en detalle su trabajo sobre los agujeros negros.

Según la descripción de Hawking, los agujeros negros son una especie de desgarraduras en el tejido del espacio y el tiempo; en ellos, las inimaginables fuerzas gravitacionales originan una enorme deformación y densidad, de tal forma que durante años los científicos creyeron que nada podía escapar de su interior, incluida la luz. Los agujeros negros son, por tanto, invisibles por definición. Nadie ha visto ni verá nunca ninguno de ellos, por muy potente que fuera el telescopio utilizado.

Hawking está seguro de que existen. Según dice, «es posible que haya unos mil millones de ellos sólo en nuestra galaxia.» Cuando le pregunté si había alguna prueba de su existencia, reconoció que por el momento ésta sólo podía confirmarse mediante las soluciones especiales de la relatividad general y por algunas series insuficientes de datos físicos indirectos.

A pesar del misterio que los envuelve, en los últimos años los físicos han empezado a recurrir a los agujeros negros (en gran parte debido al trabajo de Hawking), para explicar todo lo relacionado con la evolución del Cosmos desde la creación de las galaxias y los quasars hasta el final del propio Universo.

«Es algo así como utilizar lo inexplicable para explicar lo inexplicable», me decía Hawking, el cual disfrutaba enormemente con los enigmas de estos cuerpos, los más misteriosos de cuantos existen en el Universo. «En el interior de los agujeros negros el espacio y el tiempo, tal como solemos percibirlos, se acaban. Es una idea perturbadora.»

Cualquier objeto, como un asteroide o un astronauta, que llegara a acercarse demasiado al borde de un agujero negro, se estiraría en primer lugar como una cinta de goma, y a continuación desaparecería en el orificio sin dejar rastro. En este

sentido, los agujeros negros son como aspiradores cósmicos que absorben todo lo que encuentran, desde estrellas gigantes a partículas de polvo espacial, incluyendo los fotones que componen la luz. Nada puede escapar a un agujero negro.

Hawking y otros teóricos están convencidos de que el concepto físico de la unificación tan ansiosamente buscado (la teoría que explicaría la interacción central del Universo), se encuentra en torno a los agujeros negros o a otras construcciones peculiares del mismo tipo que se hayan producido en algún momento de la evolución del Cosmos.

Una construcción matemática como ésta tendría que explicar (al menos en teoría) la constitución de cada pedazo de materia del Universo, así como la de las fuerzas que interactúan en esta materia (sería algo parecido a confeccionar una receta cuyos componentes pudieran servir al mismo tiempo para hacer sopa y cemento, y todo ello expresado en términos matemáticos). Aunque parezca una posibilidad demasiado remota, Hawking me ha asegurado que, en un plazo de veinte años o menos, la física se habrá convertido en un concepto omnicomprensivo.

Al preguntarle cómo comenzó a interesarse por los agujeros negros, Hawking me dijo: «Los agujeros negros fueron los que me mostraron por primera vez que las interacciones fuertes que mantienen unidas las partículas elementales podían vincularse a la fuerza de la gravedad, cuyo poder es más limitado. Además, los agujeros negros tienen un cierto atractivo en sí mismos, en su misterio y en las imágenes que sugieren a la mente humana.»

Los agujeros negros constituyen la consecuencia natural de la muerte de las estrellas. Si la contracción de una estrella puede originar una singularidad, un agujero negro podría describirse como la última fase de la muerte de una estrella antes de que llegue a producirse la singularidad. El agujero

negro es el que oculta finalmente la singularidad al resto del Universo, creando una ruptura en el espacio-tiempo que se encuentra a su alrededor.

Valiéndose únicamente de las ideas de Newton sobre la gravedad y la luz, el científico francés Pierre Simon Laplace sugirió por vez primera en 1796 lo que podía suceder si una estrella tenía un tamaño demasiado grande. Su hipótesis era que, en tal caso, podría producirse una enorme atracción gravitatoria capaz de atrapar toda la radiación generada por la estrella, incluida la luz.

«Es posible que los cuerpos luminosos más grandes del Universo puedan llegar a hacerse realmente invisibles», escribió Laplace anticipándose en casi dos siglos a su época.

En el caso del Sol se ha producido una neutralización entre las fuerzas contendientes durante cerca de cinco mil millones de años. Los astrónomos piensan que este equilibrio continuará por lo menos durante un período de tiempo similar, al final del cual la gravedad comenzará a ganar por fin la lucha, a medida que el combustible nuclear del Sol se vaya gastando. En ese momento la masa del Sol, una esfera de gas caliente y denso de 1.390.000 km de diámetro, comenzará a contraerse.

Al llegar a un punto determinado de condensación, la materia del Sol se convertirá en lo que los astrónomos denominan una "enana blanca", nombre expresivo que describe la configuración que tendrá entonces el astro: una bola incandescente formada por núcleos atómicos y electrones libres cuyo tamaño será sólo cuatro veces más grande que el de la Tierra, lo que constituye un volumen minúsculo en términos cósmicos.

Sin embargo, la masa del Sol continuará siendo la misma que en la actualidad, lo que significa que la atracción gravitatoria de la materia atómica de su superficie será mucho más intensa de lo que es ahora. Para escapar de la superficie solar, una nave espacial tendría que aumentar su velocidad desde los 610 kilómetros por segundo que se requerirían hoy hasta cerca de 3.300 kilómetros por segundo.

La contracción podría continuar. Los físicos sostienen que una estrella puede contraerse indefinidamente, aunque para llegar a ese punto de autoaniquilación permanente, la estrella tendría que tener una masa enorme. En el caso del Sol, que sólo tiene una masa inicial mediana, su contracción se detendrá en el momento en que se convierta en una enana blanca, debido a la intervención de una ley física llamada principio de exclusión.

Según esta ley, dos electrones no pueden ocupar el mismo espacio energético, lo que significa que existe un límite para la compactación de la materia. No obstante, se trata de un límite muy amplio: en la fase de enana blanca, un pedazo del Sol del tamaño de una nuez pesaría varias toneladas.

Si la estrella originaria tiene una masa más grande (se calcula una proporción de 1,4 veces o más superior a la del Sol), el principio de exclusión será anulado por la fuerza de la gravedad. El proceso de contracción que sufre la estrella podría continuar hasta el momento en que se produjera la separación de los núcleos atómicos y la consiguiente destrucción de los átomos.

Finalmente, aparecería una "estrella de neutrones", una pesada masa neutrónica con un diámetro de apenas unos cuantos kilómetros. La velocidad de escape en su superficie tendría que ser ahora de 190.000 km/seg. Si la estrella tiene un volumen de unas 3,6 veces el tamaño del Sol, no dejará de contraerse hasta llegar a esta fase de estrella de neutrones. En este momento la gravedad es claramente dominante y nada puede oponerse a su fuerza. La estrella, víctima de su propio peso, se comprime sobre sí misma hasta llegar al punto en el que la velocidad de escape de su superficie debe alcanzar los 300.000 km/seg (la velocidad de la luz). Si pudié-

ramos ver entonces la ya escasa luz del astro, no mucho más brillante que una sombra electromagnética débil, comprobaríamos que nuestra percepción comienza a desvanecerse.

La última víctima de la gravedad es la luz. La antigua estrella, ahora un agujero negro, se ha convertido en un punto absolutamente invisible, y así se mantendrá durante mucho tiempo.

Los astrónomos han podido detectar señales procedentes de enanas blancas que aún continúan irradiando luz suficiente como para impresionar las placas fotográficas de los grandes telescopios, y los pitidos electromagnéticos de las estrellas de neutrones pueden ser captados por radiotelescopios. En cambio, los agujeros negros se muestran mucho más remisos a dar muestras de su existencia, dadas sus especiales características físicas. En general, se cree que existen verdaderamente, aunque los astrofísicos (e incluso los físicos teóricos) están deseosos de comprobarlo de forma visual.

Por lo que respecta a Hawking, ¿de verdad cree que los agujeros negros existen más allá de la quimera de una ecuación? No sólo eso, sino que está convencido, al igual que otros físicos, de que ya se ha encontrado por lo menos uno. Según sostiene, «si miramos hacia la constelación del Cisne, es muy posible que nuestra visión se esté dirigiendo hacia un agujero negro.»

Algunas estrellas, denominadas binarias, se mueven en grupos de dos y giran en torno a un centro común de gravedad. Los astrónomos afirman que si una de las estrellas de un sistema binario se contrajera en un agujero negro, la invisible estrella negra continuaría manteniendo su influjo gravitatorio sobre su compañera visible. Hawking piensa que los astrónomos han encontrado uno de estos matrimonios mixtos en la constelación del Cisne, a 6.000 años luz de la Tierra. «La estrella visible es azul» dice Hawking, «y se encuentra estirada y deformada.» Ello es debido a que su compañera, converti-

da en agujero negro, ejerce una enorme atracción gravitatoria sobre ella, lo que la confiere un aspecto ovalado.

El descubrimiento, realizado en 1973, de este posible agujero negro en el sistema binario denominado Cisne X-1, ha despertado una gran curiosidad entre los astrofísicos teóricos, cuyo interés en este fenómeno es mayor incluso del que tendrían si encontraran otro planeta en el sistema solar más allá de Neptuno (en la actualidad, debido a una característica transitoria de su órbita, Neptuno es el planeta más alejado del Sol). Las causas de este agujero negro son objeto de inacabables especulaciones.

Hawking mantiene una apuesta con Kip Thorne, reconocido teórico del Instituto de Tecnología y uno de sus mejores amigos, sobre los orígenes del misterioso objeto de Cisne X-1. Si se comprueba que el sistema binario no contiene un agujero negro (lo que rompería el corazón a más de un físico), Hawking ganará una suscripción por cuatro años a la revista británica de humor *Private Eye*. Si el agujero negro existe de verdad, Thorne conseguirá una suscripción por un año a *Penthouse*.

Esta desigual apuesta de cuatro a uno se ha hecho muy famosa en los círculos físicos. Cabe preguntarse el motivo por el que Hawking ha apostado contra los agujeros negros, teniendo en cuenta que de su trabajo se deriva casi directamente la existencia de los mismos. «En realidad se trata de una manifestación de mi psicología», me dijo un día que hablábamos sobre la probabilidad de que Cisne X-1 contuviera un agujero negro. «Realmente yo tengo más posibilidades de ganar que Kip, pues todas las observaciones (como la emisión de pulsos, por ejemplo), refutarían la hipótesis de un agujero negro.»

No obstante, Hawking está convencido de que en Cisne X-1 se llegará a encontrar algo. «Si no es un agujero negro, tendrá que ser algún fenómeno peculiar.»

Es posible que se hayan encontrado otros casos similares. Por ejemplo, en 1983 un equipo de astrónomos canadienses y norteamericanos anunciaron que habían descubierto un segundo agujero negro, en esta ocasión situado fuera de nuestra galaxia. Localizaron por su emisión de poderosos rayos X en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea que sólo es visible desde el hemisferio sur.

Valiéndose del telescopio de 400 centímetros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile, los astrónomos calcularon que la distancia entre el agujero negro y la Tierra es de 180.000 años luz, que su peso es unas diez veces superior al del Sol, y que el espacio que lo separa de su compañera binaria apenas comprende unos 17 millones de kilómetros.

Tanto si se encuentra en el Cisne, en la Gran Nube de Magallanes o en cualquier otro sitio, un agujero negro es siempre un misterioso habitante del Universo, pues su existencia altera las leyes de la física. Por otra parte, ¿qué es lo que impide el que un agujero negro continúe el proceso de contracción hasta convertirse en una singularidad, en una partícula infinitesimal de enorme densidad similar a la que existió en los inicios del Big Bang?

En sus primeros trabajos, Hawking y Penrose demostraban que éste podría ser precisamente el caso de algunas estrellas apagadas. Años más tarde, los trabajos de Hawking en colaboración con otros colegas indicaban la posibilidad de que un agujero negro adoptara un estado estacionario en el cual ya no existiría ninguna relación con la estrella de la que aquél había surgido. De hecho, estos agujeros negros sólo tendrían tres parámetros mesurables: la masa, la velocidad de rotación y la carga eléctrica.

«Esto podría tener una auténtica importancia práctica» me dijo Hawking cuando le pregunté el significado de que un objeto que no puede verse ni medirse tenga en cambio parámetros reales.

«Bien», explicaba, «eso significa, en primer lugar, que podría establecerse con precisión la estructura del campo gravitatorio de cualquier agujero negro. Significa además que podrían construirse modelos de objetos astrofísicos (como el de Cisne X-1) en los que puedan encontrarse agujeros negros. De esta forma podrían compararse las características de cada modelo con las observaciones reales.»

Durante la década de 1970 los agujeros negros empezaron a tomar la apariencia de un fenómeno cultural. En llamativos slogans publicitarios y camisetas se nos aseguraba que "los agujeros negros no se dejan ver". Se convirtieron en un tópico muy repetido en los espectáculos humorísticos y en tema frecuente de bromas y chistes. Seguramente, esta pasión popular que se extendió a mediados de los años setenta hacia los agujeros negros fue sólo una moda pasajera. En este sentido, los agujeros negros fueron una especie de triángulo espacial de las Bermudas, un misterio similar a los de la parapsicología, el ocultismo, los ovnis y la astrología.

Las imágenes de un agujero negro y del Big Bang provocan un efecto de desconcierto y placer en nuestro subconsciente. Los agujeros negros podrían ser una metáfora de nuestro destino o del fin del Universo. Si una estrella puede autodestruirse, ¿por qué no podría hacerlo también el Universo entero?

«La idea de poner a estos fenómenos el nombre de agujeros negros fue una genialidad por parte de John Wheeler», me decía Hawking. «Es un nombre que evoca multitud de neurosis humanas. No cabe duda de que existe una relación psicológica directa entre el acierto de esta denominación y la popularización de los agujeros negros.»

«Es importante que cada concepto reciba un nombre adecuado», decía durante una momentánea reflexión sobre la

psicología de los términos científicos. «Ello despierta la atención de la gente. Supongo que el nombre de "agujero negro" tiene un matiz algo dramático, pero también es muy expresivo. Su impacto psicológico es intenso. Podría constituir una imagen apropiada para representar los temores humanos sobre el Universo.»

Al igual que se desconoce totalmente lo que pudo haber antes del Big Bang, también se ignora por completo lo quê existe en el centro de un agujero negro. El tiempo normal deja de existir, de la misma forma que no debió existir antes del Big Bang. En este aspecto se encuentra uno de los principales atractivos que tienen los agujeros negros para Hawking. Por otra parte, estos dos conceptos sirven de nexo de unión entre los dos pilares básicos de la física del siglo XX: la teoría de la relatividad general de Einstein y la teoría cuántica de Max Planck. En un audaz y arriesgado desafío teórico, Stephen Hawking propuso en 1974 una nueva y sorprendente idea sobre los agujeros negros en la que se sugería por vez primera que los quarks y los quasars podían actuar efectivamente dentro de los límites de una única (aunque oculta) ley física.

6. La explosión de los agujeros negros

El Laboratorio Rutherford-Appleton se encuentra a unos cuantos kilómetros de la autopista londinense M4; situado al oeste de la capital, en las áridas y desoladas llanuras del sur de Oxford, se tarda aproximadamente una hora y media en llegar viajando en coche. Rutherford-Appleton, construido en una superficie de varios kilómetros cuadrados, se halla al lado de Harwell, el equivalente británico del estadounidense Laboratorio Nacional Los Álamos, próximo a Santa Fe de Nuevo México.

Aunque los científicos de ambos centros se dedican a la investigación básica de las partículas físicas, la física teórica y la energía, la función primordial de Los Álamos y Harwell es la de confeccionar diseños de armas nucleares. A pesar de su lejanía, ambos laboratorios guardan ciertas semejanzas entre sí: cercados de alambre aparentemente inseguros, indiferentes guardas de mediana edad y no demasiados controles, todo lo cual parece ocultar el trabajo de alto secreto que se realiza en los dos laboratorios, creando un ambiente de estudiada despreocupación en el que se sienten a gusto los científicos que allí trabajan.

En el invierno de 1974 Hawking realizó un viaje desde Cambridge a Rutherford-Appleton con el propósito de pre-

sentar un trabajo que le había hecho sufrir durante meses y que aún le producía quebraderos de cabeza el día en que iba a mostrárselo a sus colegas. El título de la conferencia era: «¿Explotan los agujeros negros?»

Pese a su habitual confianza en sí mismo, Hawking estaba preocupado por el recibimiento que podría tener su trabajo. Lo que iba a proponer era una idea radicalmente nueva que, de ser cierta, obligaría a realizar un replanteamiento básico en la física teórica. La pregunta que encabezaba el escrito constituía un reflejo de sus propias dudas. Era como si Isaac Newton se hubiera sentido inseguro de sus teorías y hubiera publicado un folleto titulado "¿Son atraídos hacia abajo los objetos por la fuerza de la gravedad?"

A pesar del prestigio de Hawking, el auditorio se encontraba un poco predispuesto en su contra. La sala de conferencias estaba abarrotada de físicos especialistas en partículas y en la experimentación con aceleradores. Estos científicos mostraban una actitud recelosa ante los teóricos cosmológicos, cuyo trabajo desarrollaba demasiadas fórmulas matemáticas y pocos resultados prácticos que pudieran convencer a la mayoría de los físicos experimentales. También había aparecido por allí algún físico especializado en armas nucleares.

Hawking inició la conferencia. Las luces se apagaron y las diapositivas con sus ecuaciones comenzaron a proyectarse sobre una pantalla. A medida que avanzaba en su exposición, se hizo evidente que Hawking había llegado a una sorprendente conclusión sobre los agujeros negros, a una idea totalmente opuesta a las concepciones convencionales del momento.

La mayor parte de los físicos siguieron con dificultad las explicaciones. Se hicieron algunas preguntas y Hawking concluyó rápidamente su exposición. Cuando se encendieron las luces, el moderador, John Taylor, profesor de matemáticas en la Universidad de Londres y autor de varios libros de divulgación tales como *Black Holes* y *The Shape of Minds to Come* (una especulación parapsicológica), se levantó y dijo: «Lo siento, Stephen, pero esto es una absoluta basura.»

La conferencia que expuso Hawking aquel día en Rutherford-Appleton tenía su origen en el trabajo que había comenzado a desarrollar en 1970. Su interés sobre los agujeros negros se había incrementado notablemente dos años antes, en 1968, debido al descubrimiento de unas radiofuentes cósmicas rápidas y pulsantes. Tras la confusión inicial que se produjo entre los astrofísicos en relación con las causas de este fenómeno, se interpretó en general que su origen eran unas estrellas de neutrones que giran a gran velocidad y cuya masa es similar a la del Sol, aunque su radio no supera los 16 kilómetros.

Estas radiofuentes, que recibieron el nombre de "pulsars", parecían confirmar la existencia de las estrellas de neutrones, astros contraídos que se componen casi totalmente de neutrones comprimidos con una densidad similar a la de un núcleo atómico y, por consiguiente, con un peso enorme (un trozo contenido en una taza podría pesar toneladas). Una estrella de neutrones no es un agujero negro, sino un paso en el proceso que conduce a la formación de éste, un punto intermedio en la contracción que se produce cuando la gravedad de la estrella se impone sobre la fuerza expansiva de su horno nuclear.

Esta clara confirmación de la existencia de las estrellas de neutrones demostró que las teorías sobre el progreso de la contracción estelar eran esencialmente correctas. En 1968, los cosmólogos pudieron afirmar sin reservas que «si existen las estrellas de neutrones, ¿por qué no podrían existir también los agujeros negros?». Al contrario de lo que sucede con las estrellas de neutrones, los agujeros negros, por su propia naturaleza, no pueden emitir ninguna clase de radiación. Su

único efecto visible sería su influencia gravitatoria sobre una estrella próxima. La comprobación de este fenómeno se produjo en 1972 con el descubrimiento de Cisne X-1, el sistema binario que motivó la apuesta entre Hawking y Kip Thorne.

Tres años antes, en 1969, Roger Penrose concibió un experimento ideal en el que se sugería la posibilidad de que un agujero negro llegara a ejercer sobre la materia cercana a él una influencia distinta a la de la gravedad. La conclusión de este experimento era que un agujero negro podía producir energía en el caso de que dicho agujero girase sobre sí mismo. Este efecto, denominado "superresplandor", indicaba la posibilidad de que ciertos tipos de ondas próximas a un agujero negro fueran amplificadas y expulsadas (en lugar de absorbidas) por el movimiento rotatorio del mismo.

El experimento ideal de Penrose sugería también que era posible que el agujero negro expulsase una parte de su energía rotacional. Se trataba del primer intento por demostrar que un agujero no tenía por qué existir necesariamente como una entidad en sí misma, aislada del resto de la materia cósmica. Un agujero negro en rotación podía perder energía eléctrica o rotacional mediante un proceso conocido como creación dual, cuyo punto de partida era la formación de una partícula junto con su antipartícula (p. ej., un electrón y un antielectrón o positrón), en el exterior del agujero.

En tal caso podría suceder que el electrón fuera atraído por la gravedad hacia el agujero negro mientras que el positrón escaparía. Durante este proceso se anularía una minúscula parte de la propia carga eléctrica del agujero negro y se desprendería una pequeñísima parte de su momento angular (o giratorio).

En aquellos días la atención de Hawking estaba centrada en los límites que circundan a un agujero negro, es decir, el punto exacto en el que la luz puede aún escapar al poderoso abrazo de la gravedad del agujero. Este límite se llama "horizonte eventual", y el área de su superficie es tanto más extensa cuanto más grande es el agujero negro.

El horizonte eventual puede imaginarse como una especie de membrana de una sola dirección a través de la cual puede entrar la luz pero nunca puede salir. Un observador situado en el interior del agujero negro podría ver los destellos de luz emitidos por una nave que intentara emitir un mensaje cifrado desde el exterior del horizonte eventual.

El observador, en cambio, no podría devolver la señal. La luz, la onda de radio o cualquier otra forma de energía quedarían atrapadas en el interior del horizonte eventual. Si el capitán de una astronave enviara un explorador al interior del agujero para recoger información sobre su naturaleza, nunca volvería a saberse nada de dicho explorador.

El horizonte eventual, que ha hecho fracasar los intentos del capitán y su explorador, resulta en cambio menos frustrante para los físicos teóricos. De hecho, según Hawking y otros físicos, este horizonte contiene implicaciones fascinantes, como por ejemplo, la idea de que la luz (o cualquier otra cosa) se hace invisible para un observador exterior cuando cae en un agujero negro. Los físicos han extendido esta noción de información perdida a lo que ellos llaman el teorema de "los agujeros negros no tienen pelo".

Esta extraña expresión, muy típica de la jerga de los físicos, significa sencillamente que dos agujeros negros con idéntica masa, carga eléctrica y rotación, tendrán la misma apariencia para un observador exterior que ignorase la composición de los mismos. Incluso si uno de los agujeros negros estuviera hecho de materia y el otro de antimateria, ambos serían imposibles de distinguir, lo que significa que la mayor parte de las características físicas de un agujero son permanentemente invisibles para un observador.

Al considerar estas características, los físicos comprendieron que las dimensiones del área superficial de un agujero ne-

gro (es decir, las dimensiones de su horizonte eventual), constituían el único rasgo significativo para alguien situado en el exterior. Esta era la única característica que podía expresarse en términos numéricos reales y significativos, dado que todo lo demás que hay en un agujero negro se halla fuera del alcance de nuestra percepción.

Hawking comenzó a darse cuenta de la importancia del tamaño del horizonte eventual, que era su aspecto más interesante, a finales de 1970. Una noche, cuando se disponía a irse a la cama, se vio asaltado por una idea tan clarificadora que apenas pudo dormir. Esta idea indicaba sencillamente que las dimensiones del horizonte eventual de un agujero, es decir, su área superficial, no pueden decrecer nunca. Se trataba de una concepción simple que podía entenderse con facilidad sin ayuda de las matemáticas.

«Bueno, a uno se le puede ocurrir una idea en cualquier sitio», dijo Hawking posteriormente. Pocos días después de aquella noche insomne, él y algunos de sus colegas comprobaron la idea de forma matemática. Los resultados parecieron positivos.

Para llegar a su conclusión sobre el horizonte eventual de los agujeros negros Hawking se valió de las ideas de la relatividad general. Volvamos al capitán de la astronave que había enviado un explorador para inspeccionar el interior de un agujero negro. Al abandonar la astronave en su pequeño módulo de reconocimiento, el explorador se aproximaría directamente al agujero y a continuación atravesaría el horizonte eventual. Ésta sería la forma en que lo percibiría el explorador, suponiendo que pudiera mantener la consciencia.

El capitán, situado en el puente de mando de la astronave, vería al explorador aproximándose al agujero negro en una lenta (e interminable) espiral en torno al mismo; la velocidad aparente de la nave exploradora tendría una relación directa con la velocidad rotatoria del agujero negro, en el caso

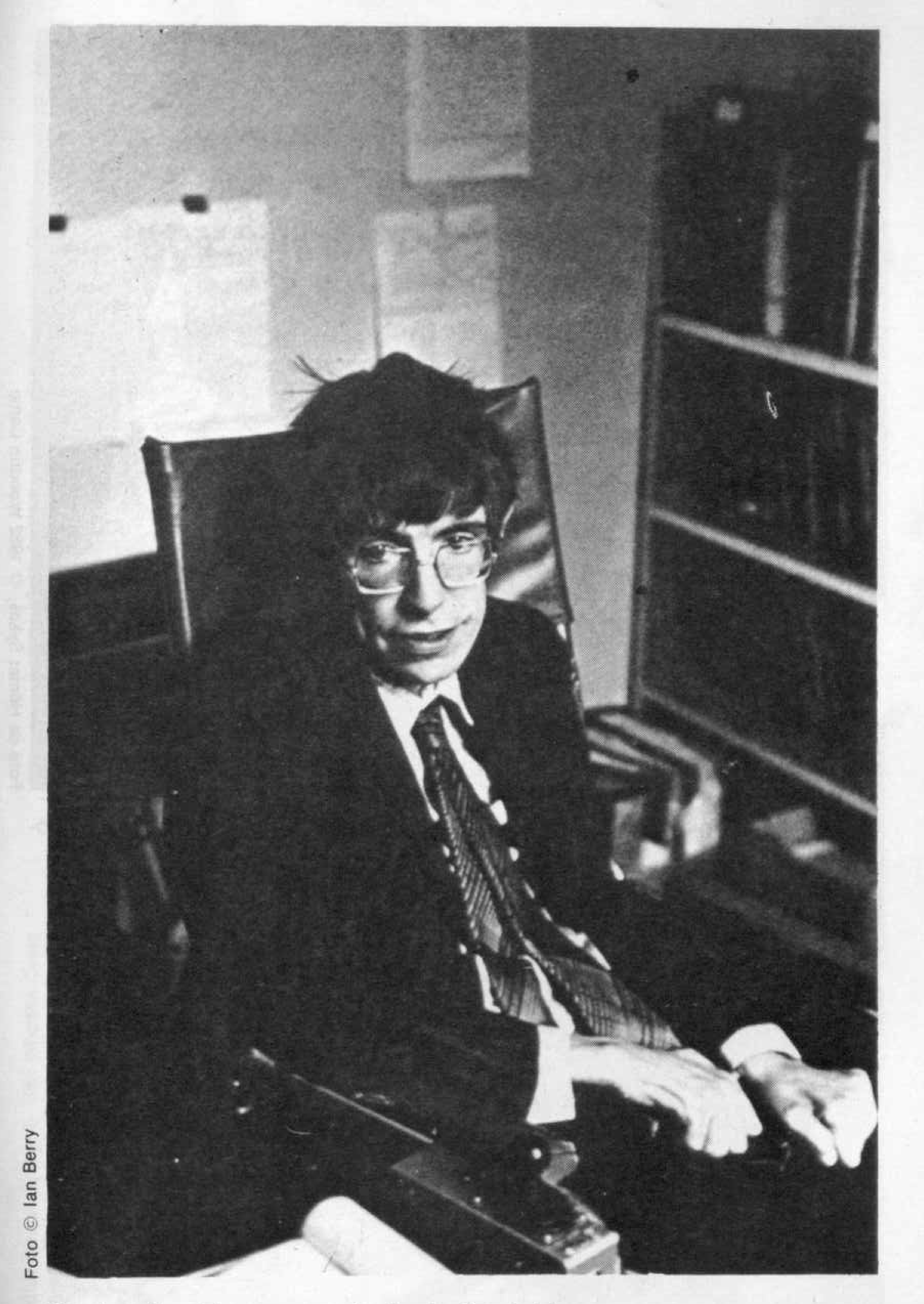


Foto © Ian Berry

Stephen Hawking en su estudio de Cambridge.



Retrato de la familia Hawking. De izquierda a derecha: Lucy, Stephen, Robert, Timothy y Jane.

Hawking con algunos estudiantes en la Universidad de Cambridge.►

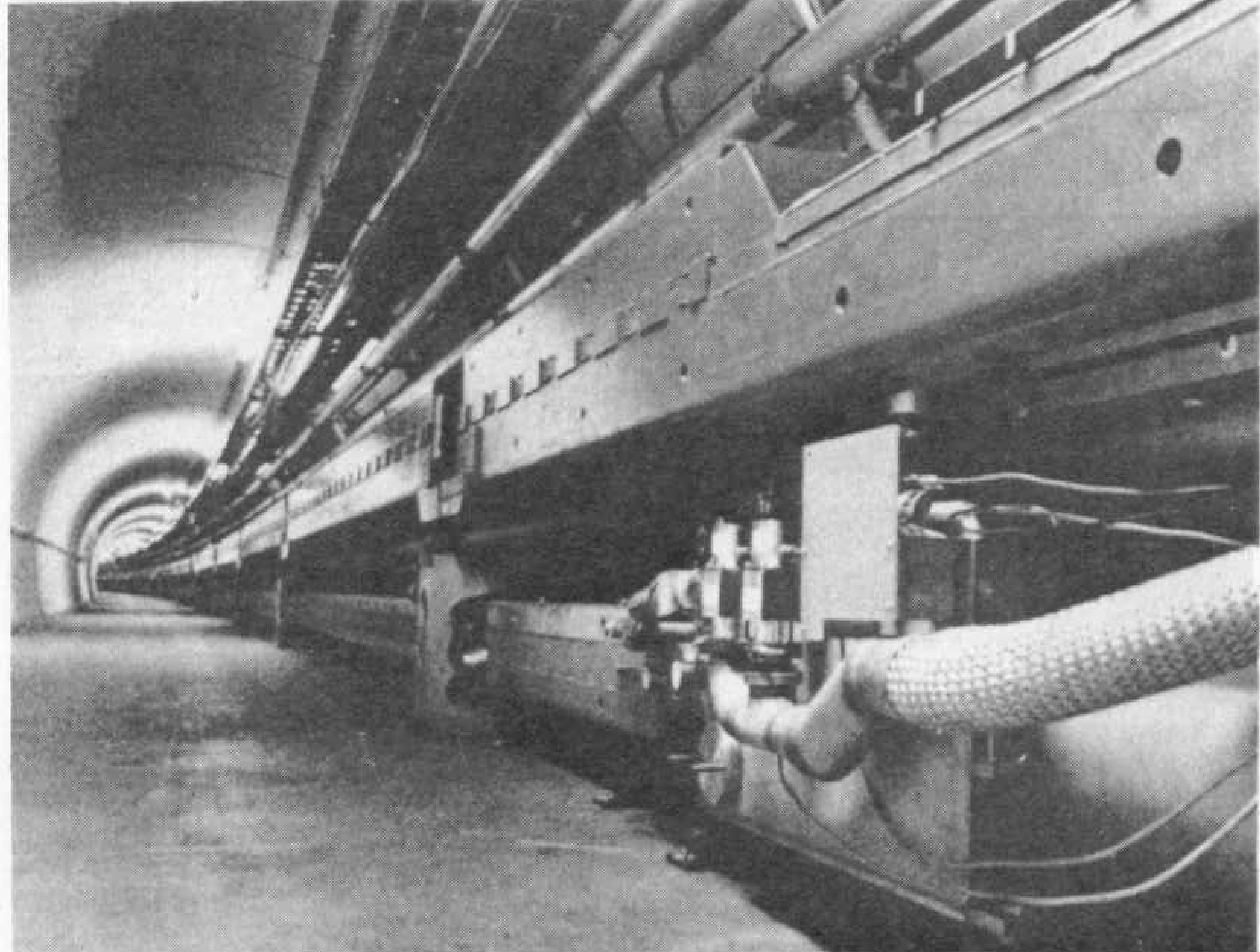


Hawking en el estudio de su casa con Robert y Timothy.





Fotografía Fermilab



Fotografía Fermilab

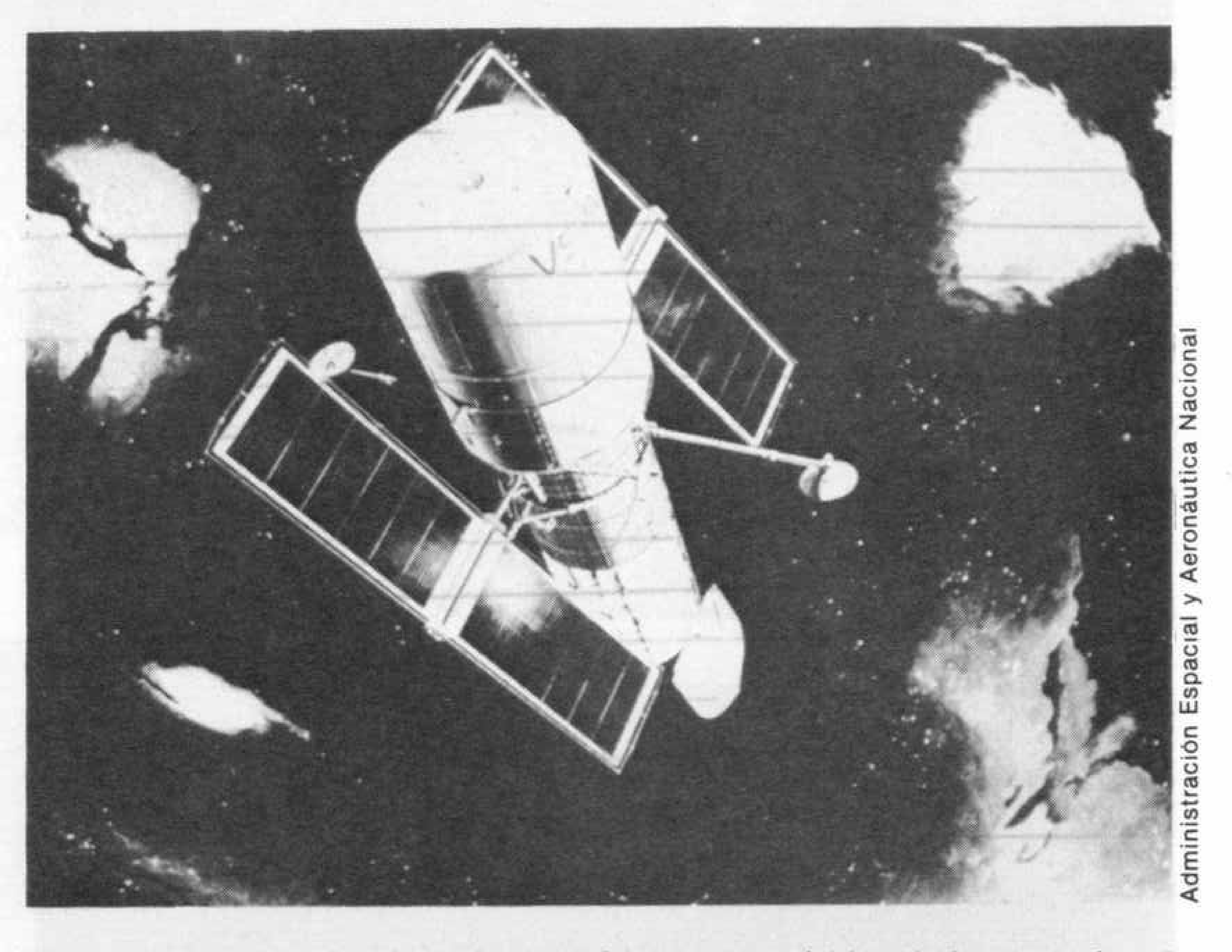
El acelerador del Laboratorio Nacional Fermi. Situado en Batavia, Illinois, el Fermilab es uno de los aceleradores de partículas más grandes del mundo. Mediante estos "desintegradores de átomos", los científicos están descubriendo un nuevo y variopinto mundo de partículas subatómicas. Tal vez estas partículas puedan decirnos algo definitivo sobre el funcionamiento del Universo en sus primeros momentos y sobre la posibilidad de encontrar una teoría unificada para explicar todos los fenómenos.





Fotografía del Observatorio Lick

S-17, una nube gaseosa en la que quizá se encuentre un agujero negro.



Administración Espacial y Aeronáutica Nacional

El telescopio espacial. Cuando la NASA ponga en órbita el observatorio espacial a finales de la década de 1980, los científicos tendrán la posibilidad de mirar mucho más lejos de lo que lo han hecho hasta ahora. Los físicos esperan que sus observaciones confirmarán los trabajos de teóricos como Hawking acerca de la existencia de agujeros negros y singularidades.

La Gran Nube de Magallanes, galaxia satélite de la Vía Láctea, emite potentes rayos X que, según los científicos, podrían ser la evidencia de que en su interior se encuentra un agujero negro.

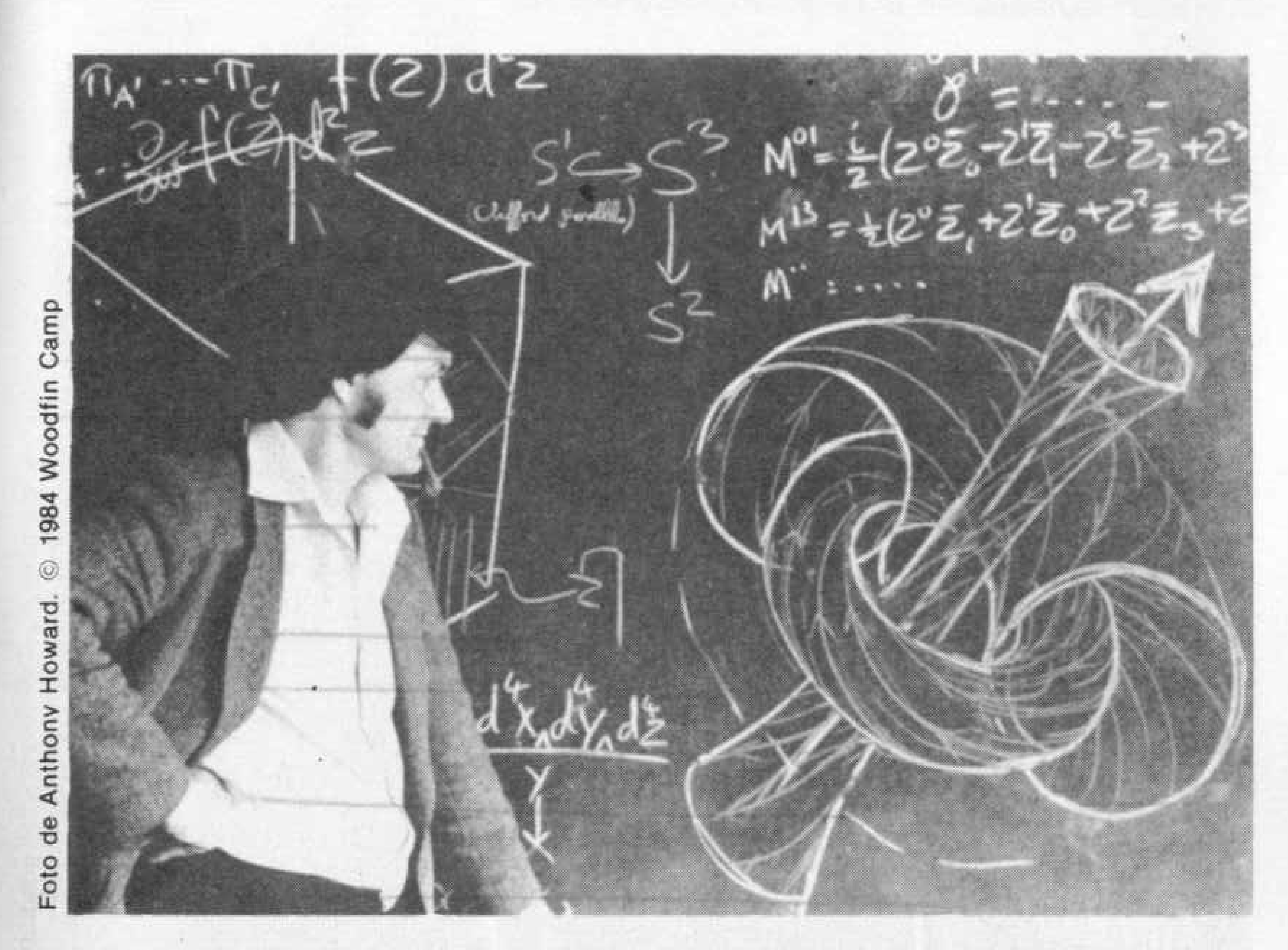
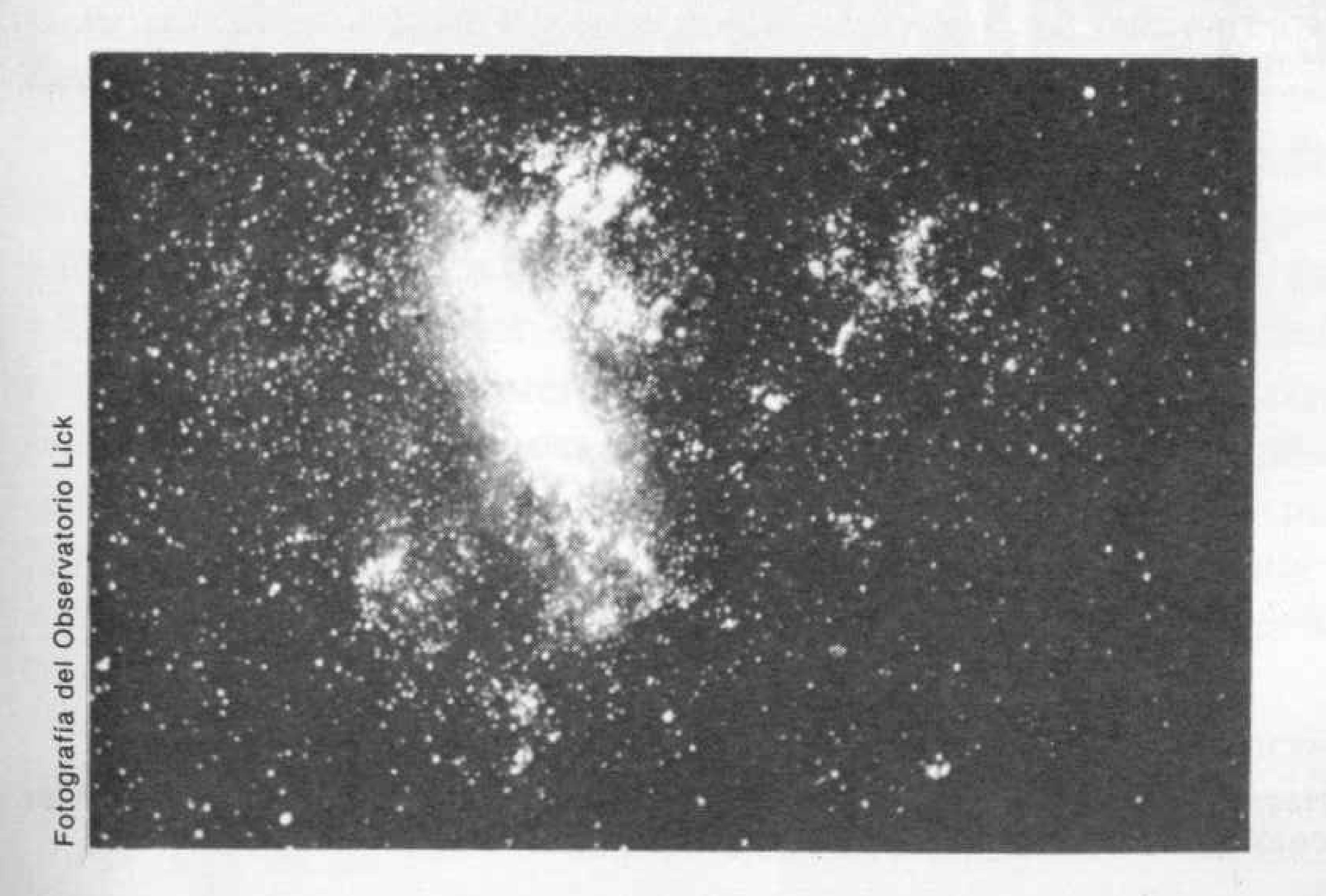
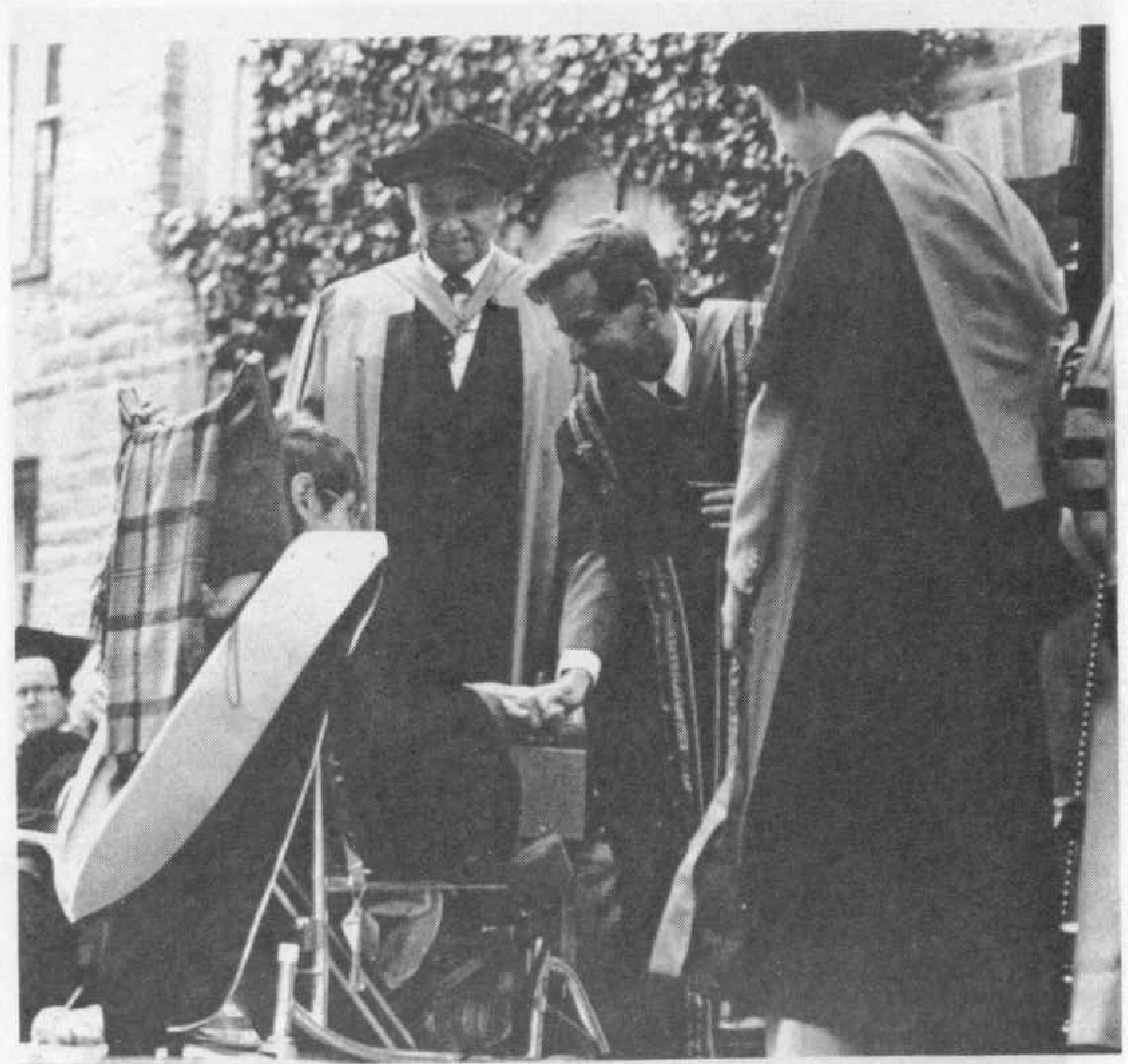


Foto de Anthony Howard. © 1984 Woodfin Camp

Roger Penrose, el colaborador de Hawking. En la década de 1960 ambos demostraron con éxito que el tiempo tuvo realmente un comienzo.



Fotografía del Observatorio Lick



Hawking recibe el título de doctor *honoris causa* en la Universidad de Princeton en 1982.

de que éste girase. El capitán nunca podría ver a su explorador penetrando en el horizonte eventual.

Las diferentes escalas de tiempo son consecuencia de un caso exagerado de dilatación temporal, similar al experimentado por un viajero espacial que se trasladase a la velocidad de la luz. En las proximidades del horizonte la fuerza gravitatoria del agujero negro es tan grande que es capaz de impulsar a cualquier objeto a una velocidad cercana a la de la luz.

Desde la nave espacial, protegida de la influencia del campo gravitatorio, el capitán vería viajar al explorador a una velocidad exponencialmente lenta, del mismo modo en que un viajero espacial que volase a la velocidad de la luz parecería no haber envejecido nada a los ojos de un observador terrestre. El ritmo al que parece disminuir la velocidad de la nave exploradora desde la posición del capitán es por tanto inversamente proporcional a la atracción de la gravedad en el horizonte eventual. Cuanto más grande sea el agujero negro (y su fuerza gravitatoria), más lenta parecerá la velocidad del explorador desde la posición del capitán. La misma situación se reproducirá a la inversa en el caso del explorador: cuanto más grande sea el agujero negro, su movimiento hacia el horizonte eventual parecerá más lento.

Para Hawking, la idea de la relatividad general sobre la dilatación del tiempo significaba que las dimensiones del horizonte eventual nunca podrían contraerse desde el punto de vista de un observador exterior. Esta idea constituía un importante paso en la investigación teórica de los agujeros negros, pues por vez primera se había establecido una limitación universal al comportamiento de todos los agujeros negros: un horizonte eventual no puede decrecer, sólo puede aumentar. Antes de que se formulara esta hipótesis no existía ningún límite estático o dinámico en los agujeros negros.

La idea de Hawking sobre un horizonte eventual incongible establecía asimismo un importante nexo de unión con el

concepto de entropía, que por definición también se incrementa con el tiempo. La noción de entropía, derivada de la segunda ley de la termodinámica, afirma que la cantidad de energía disponible para realizar una acción física siempre tiende a decrecer. *Entropía* es la palabra que define esa gradual "inutilidad" de energía que se produce a medida que ésta se transforma de un tipo a otro, como por ejemplo, al convertirse la electricidad en calor.

Las formas de energía que tienen mucha utilidad, como la electricidad, tienen poca entropía, mientras que la energía poco útil, como el calor, tiene mucha entropía. La energía con poca entropía siempre puede transformarse en energía con mucha entropía (la electricidad se convierte fácilmente en calor). En cambio, el proceso inverso es imposible, pues la entropía nunca puede decrecer; siempre aumenta en la misma proporción en que se incrementa la inutilidad de la energía. Este hecho se verifica en cualquier sistema: un automóvil, una computadora, una estrella o el Cosmos. Desde el momento en que se estableció que el horizonte eventual de un agujero negro tampoco decrecía nunca, se pensó que era razonable atribuir un valor entrópico a cada agujero negro; este valor serviría para describir muchas de sus características físicas, que de otra manera hubieran permanecido indefinidamente ocultas para los observadores exteriores.

Sin embargo, esta concepción originó una dificultad importante: al atribuirse un valor entrópico a un agujero negro, también tendría que establecerse un valor térmico si se quería mantener un modelo termodinámico factible. No obstante, si un objeto tiene temperatura, deberá irradiar calor, y los agujeros negros, según su definición clásica, no emiten absolutamente nada. Hawking trabajó durante años en este problema, cuya solución quedó expresada en el documento que presentó en el Laboratorio Rutherford-Appleton.

Mientras tanto, Hawking continuó investigando los agujeros negros. En 1971 llegó a la conclusión de que su origen no tenía por qué ser exclusivamente la muerte de una estrella, y afirmó que el Universo podía contener millones de agujeros negros que no tuvieran nada que ver con estrellas degradadas.

Hasta ese momento los teóricos pensaban que el único campo gravitatorio suficientemente poderoso como para formar un agujero negro sería el producido por una estrella en contracción con una masa diez o quince veces superior a la del Sol. Ahora se planteaba el interrogante de cómo podría formarse un agujero negro de reducidas dimensiones, como por ejemplo, del tamaño de un átomo. ¿Podría provocar la gravedad una contracción en cualquier clase de materia, estelar o de otro tipo, hasta alcanzar ese tamaño? Era un problema difícil de dilucidar, teniendo en cuenta que la gravedad casi no ejerce ningún efecto en el interior de algo tan diminuto como un núcleo atómico.

No obstante, Hawking consiguió llegar a una inesperada conclusión: si se aplicaba una presión suficiente sobre cualquier objeto, aunque sólo tuviera una masa de uno o dos kilogramos, éste podría comprimirse hasta alcanzar una enorme densidad. En algún momento, cuando el material del pequeño objeto, por ejemplo un trozo de metal, quedara apretado en un espacio suficientemente reducido (como el tamaño de un protón), la autogravitación comenzaría a actuar y la compresión continuaría hasta la aparición de un diminuto agujero negro.

Sin embargo, en la Tierra no existe ninguna fuerza tan poderosa como para iniciar un proceso semejante, ni tampoco en el Universo visible. Hawking sabía que la respuesta se encontraba en el comienzo del tiempo. Sólo en aquel momento se produjo una concentración de toda la materia universal en el mismo lugar, al mismo tiempo y con una presión suficiente como para generar pequeños agujeros negros.

Hawking sabía que en un Universo perfectamente uniforme este proceso no podría darse. Sin embargo, si existieran irregularidades, tales como que unas regiones fueran mucho más densas que otras, las zonas con un determinado exceso de densidad podrían contraerse formando pequeños agujeros negros. Según sus cálculos, estos mini-agujeros negros pudieron acceder a la existencia en algunas regiones superdensas de la preciosa sopa primordial que existió durante el inimaginable y minúsculo fragmento de tiempo comprendido en los primeros 10^{-20} segundos posteriores al Big Bang.

Hawking piensa hoy que estos diminutos aunque poderosos puntos negros existen por miles de millones en el Universo. Según sus previsiones, la distancia media entre ellos podría ser tan próxima como la que separa a la Tierra de Plutón, lo que significaría que por cada año luz cúbico del Universo podría haber 100 millones de mini-agujeros negros.

Tras la publicación del trabajo de Hawking los físicos comenzaron a aceptar la idea de estos mini-agujeros negros, que ofrecían respuestas a algunos fenómenos incomprensibles hasta entonces y que explicaban quizá la denominada masa desaparecida que según los astrónomos teóricos debía hallarse oculta en algún lugar del Universo. La noticia de estas nuevas concepciones se extendió rápidamente por toda la comunidad mundial de físicos.

El siguiente y más atrevido paso de Hawking en su trabajo sobre los pequeños agujeros negros fue la afirmación de que algo tan diminuto como esos objetos primordiales podría ser definido mediante la mecánica cuántica.

En 1973 todo el mundo coincidía en pensar que la mecánica cuántica y la relatividad general eran incompatibles. Sin embargo, Hawking creyó que había llegado el momento de contemplar la posibilidad de que los agujeros negros, que en sí mismos constituyen un aspecto clave de la relatividad general, fueran expresados en términos cuánticos.

Al año siguiente, Hawking comenzó a investigar el comportamiento de la materia cercana a los agujeros negros, ya fueran grandes o pequeños. En otoño concibió una brillante idea. Cierto día que se encontraba inmerso en los jeroglíficos matemáticos de los agujeros negros, hizo un descubrimiento tan radicalmente opuesto a las concepciones anteriores que su primer impulso fue pensar que había incurrido en un importante error.

Hawking había descubierto que los agujeros negros, en contra de toda ley física conocida, emitían un flujo continuo de partículas. No obstante, al igual que todos los demás científicos, creía en la teoría de que los agujeros negros no podían emitir nada, excepto (posiblemente) cuando se encontrasen en rotación. Durante las semanas siguientes se dedicó a buscar el probable defecto de sus cálculos.

Lo que terminó de convencerle de que los agujeros negros podían emitir partículas fue la aplicación de la teoría cuántica en los bordes del agujero, es decir, justo en el horizonte eventual. Según sus razonamientos, el principio de incertidumbre, que constituye la columna vertebral de la mecánica cuántica, sostiene que el espacio vacío nunca está realmente vacío. El espacio siempre está repleto de objetos y fuerzas en actividad. En él se encuentran pares de partículas elementales como los electrones y sus opuestos antimateriales, los positrones, que existen durante una fracción de segundo antes de unirse y aniquilarse entre sí en una pequeña explosión de rayos X.

Si esta operación se produjera en el horizonte eventual, una de las partículas podría ser atrapada por la poderosa influencia de la gravedad y perderse en el interior del agujero, donde ya no podría volver a ser vista ni oída. La otra partícula, en lugar de unirse a la anterior, se encontraría entonces libre para escapar del agujero negro. Para un observador esta segunda partícula se comportaría como si hubiera sido expul-

sada del agujero negro (cualquier otro objeto más grande re-
gido por las leyes de la relatividad general se vería imposibili-
tado para realizar una operación cuántica de este tipo).

Ésta era una idea extraña e inesperada a finales de 1973.
Hawking no podía creer en sus propios resultados. Después
de varias semanas de trabajo, finalmente se convenció de que
había resuelto el problema que le había ocupado hasta enton-
ces: ¿de dónde procedía la energía necesaria para la opera-
ción cuántica en el horizonte eventual? La respuesta, intuida
por Hawking desde el principio y confirmada finalmente por
las matemáticas, era que el propio agujero negro aportaba di-
cha energía con su gigantesco campo gravitatorio.

Los cálculos de Hawking dieron lugar de este modo a otra
sorprendente conclusión: al aportar su energía a la emisión (o
radiación) de partículas, el propio agujero negro podría des-
componerse lentamente con el tiempo. Al final, cuando su
campo gravitatorio se hubiera desintegrado hasta el punto de
no poder seguir manteniendo la unidad del agujero negro,
éste explotaría y se dispersaría en una lluvia de rayos gamma
de alta energía.

No todos los agujeros estallarían. En el caso de los gran-
des agujeros negros originados por la contracción de una
estrella o en el de los monstruosos agujeros que según los as-
trónomos podrían existir en el centro de algunas galaxias el
proceso de descomposición duraría demasiado tiempo (varias
veces la edad del Universo). Hawking piensa que si el agujero
negro tuviera la masa de una estrella de tamaño medio,
como el Sol, su descomposición y explosión final no se pro-
ducirían hasta 10^{66} años después de que dicha estrella se
hubiera convertido en agujero negro. Es un período de tiem-
po demasiado grande, incluso en términos cósmicos, como
para que pueda tener algún significado.

Los cálculos de Hawking mostraban, sin embargo, que los
pequeños agujeros negros podrían descomponerse y explotar

mucho más rápidamente; su esperanza media de vida, de unos diez mil millones de años, aunque constituye un período muy largo, es algo menor que la edad del Universo. El radio medio de uno de estos agujeros sería de 10^{-13} cm, aproximadamente el tamaño de un protón, y su peso alcanzaría cerca de mil millones de toneladas, lo que equivale más o menos al del monte Everest.

La emisión de partículas en el horizonte eventual podría ser enorme. Según los cálculos de Hawking su potencia sería de unos seis mil megavatios, aproximadamente la misma que producen seis grandes reactores nucleares. Sin embargo, ninguna empresa comercial podría utilizar un pequeño agujero negro como fuente de energía; si uno de ellos se trasladase a la superficie terrestre, su peso lo impulsaría a través del planeta con la misma facilidad con que una bala horadaría una almohada.

La fase final de esta desintegración de los agujeros negros podría ser tan rápida que terminara en una tremenda explosión, equivalente al estallido de diez millones de bombas atómicas de un megatón. Estos cálculos no estaban infundados, y Hawking estaba seguro de que su significado en el Universo real era auténtico. De hecho, estaba dispuesto a demostrar que su teoría podía comprobarse de forma experimental, lo que constituye el elemento fundamental de toda teoría científica nueva. Estas explosiones producirían una efusión masiva de rayos gamma de alta energía. Hawking piensa que sería fácil captar estas explosiones con un gran detector de rayos gamma situado en órbita alrededor de la Tierra. Este detector podría montarse en la lanzadera espacial, y según sus estimaciones, podría servir para captar alguna de las dos posibles explosiones de agujeros negros que se producen cada siglo en cada año luz cúbico de nuestro rincón del Universo.

Cuando Hawking concibió por primera vez la idea de la descomposición y explosión de los agujeros negros, tales con-

clusiones parecían tan heterodoxas que incluso él mismo dudó de ellas. Durante semanas se concentró en sus descubrimientos, revisando mentalmente una y otra vez los cálculos que le habían hecho llegar hasta ellas. Se trataba de algo demasiado extraño y fantástico. Nadie lo creería. Él mismo había llegado a decir que «si un agujero negro se descompone y explota, entonces no es un agujero negro.» Era demasiado incluso para Hawking.

En su libro *The Structure of Scientific Revolutions*, el eminente historiador de la ciencia Thomas Kuhn señala que los grandes descubrimientos científicos casi nunca son aceptados cuando se anuncian por primera vez. Cuando un científico realiza un hallazgo decisivo (como Copérnico, Galileo o William Harvey), lo más probable es que se le ignore o incluso se le aísle durante años.

A principios de 1974, Hawking temía que esto mismo pudiera sucederle a él. Sabía que, si sus ideas sobre la explosión de los agujeros negros eran ciertas, ello supondría una revolución en el campo de la astrofísica. La idea de la estabilidad de los agujeros negros se hallaba muy arraigada. Si se demostraba que estaba equivocado, Hawking tendría que esforzarse durante años para recuperar su credibilidad.

Por eso prefirió esperar, revisando repetidamente sus cálculos y hablando sólo con algunos colaboradores y amigos cercanos sobre la posible existencia de agujeros negros no muy alejados de la Tierra, lo cual no evitó el que algunos de sus colegas cuestionaran los resultados. Un día, Martin Rees hizo una visita a Dennis Sciama y le preguntó: «¿Te has enterado de que Stephen lo está trastornando todo?»

Durante aquellos días y semanas de incertidumbre, Sciama animó discretamente a Hawking para que anunciara los resultados. Al final Sciama consiguió su propósito y Hawking decidió hacer el viaje a Rutherford-Appleton. La reacción ini-

cial fue peor de lo que temía. Hawking se preguntó por un momento si en verdad podía haberse equivocado.

El mes siguiente publicó sus resultados en *Nature*, el prestigioso semanario científico británico. En pocos días, los científicos de todo el mundo comenzaron a hablar de ello. Durante las semanas siguientes, la explosión de los agujeros negros se convirtió en una de las nuevas ideas más aludidas en las conferencias sobre física. Algunos físicos llegaron incluso a calificar la nueva teoría como uno de los descubrimientos más importantes de la física teórica desde hacía muchos años. Sciama, partidario de Hawking desde el principio, declaró que su artículo era «uno de los más hermosos de la historia de la Física.»

La dinámica de los agujeros negros descubierta por Hawking tenía muchas implicaciones importantes. Algunas de sus consecuencias eran similares, a la inversa, a las que se pensaba que se habrían producido durante el instante siguiente al Big Bang. De este modo, parecía que este modelo podría ayudar a los físicos a comprender la forma en que se crearon las partículas subatómicas y las interacciones que se produjeron entre éstas en los momentos de la génesis explosiva. Pero lo más importante fue que, al aplicar la mecánica cuántica a los agujeros negros, Hawking había dado el primer paso hacia el descubrimiento de la interacción fundamental que podría relacionar la mecánica cuántica con la relatividad general. La unificación de ambos sistemas (la denominada "cuantización de la gravedad") constituye el problema más difícil de la física.

Desde 1974 se han acumulado nuevas explicaciones matemáticas que demuestran la emisión de partículas y la explosión de los agujeros negros. La veracidad de la hipótesis ha sido confirmada por otros teóricos desde distintos enfoques. Esta emisión de los agujeros negros se llama "radiación Hawking", y ningún físico de ningún país puede explicar exactamente lo que significa.

7. La cuestión final

No hay nada tan difícil de concebir en el Universo como un agujero negro, a excepción del Big Bang, que ha despertado numerosas imágenes en la mente de los físicos. Durante poco más de un cuarto de siglo, el Big Bang se ha estado produciendo una y otra vez en estas mentes, en incontables cálculos de miles de cerebros.

Una persona que no sea especialista en física podría imaginarse algo así: en medio de un vacío tan absoluto como para desbaratar cualquier concepto humano de vacuidad, apareció un punto único de pura potencia. En el mismo instante de su creación, este punto, en el que se encontraba toda la materia, todas las dimensiones, toda la energía y todo el tiempo, estalló arrojando su contenido en todas direcciones.

En el momento de su origen, toda la materia y todas las fuerzas eran indiferentes entre sí. A medida que el Universo se expandía y se enfriaba, la materia y la fuerza comenzaron a separarse progresivamente. En la primera billonésima de segundo de su historia, el Universo se encontraba aún en este proceso de fragmentación. Los elementos constitutivos de la materia (lo que se conoce como quarks y leptones*) adopta-

* Los leptones son un tipo de partículas subatómicas en el que se incluyen los electrones, los neutrinos, los taus y los muones, es decir, todas las partículas que existen fuera del núcleo, compuesto por neutrones y protones, los cuales se definen como quarks.

ron identidades separadas dando lugar a tipos distintos que nunca más se han vuelto a unir.

La fuerza única que impulsó el cataclismo también se fragmentó, dando origen a nuevas fuerzas a medida que se formaban los quarks y los leptones, de forma que las diferentes partículas quedaron asociadas para siempre a las nuevas fuerzas que se estaban creando. Tres de estas fuerzas fragmentadas continúan actuando en el interior del átomo. La más poderosa de ellas es la interacción fuerte, que mantiene unidos a los componentes del núcleo (los quarks que constituyen los protones y los neutrones). Mil veces más débil que ésta es la fuerza electromagnética, que hace girar a los electrones (un tipo de leptón) alrededor del núcleo. Esta fuerza da una apariencia de solidez a los átomos y hace posible la existencia de ondas de radio y de luz.

La interacción débil, cien veces aún menos potente que la anterior, es la que produce la desintegración radiactiva de los átomos de algunos elementos, como el uranio, debido a la descomposición de sus neutrones.

Todas las fuerzas se transmiten por medio de bosones vectoriales, vehículos portadores de energía que sólo existen durante una fracción de segundo; la transmisión de fuerza se realiza del mismo modo en el que se transmitiría la energía entre personas situadas en barcas de remos que arrojaran un balón medicinal de una barca a otra, de forma que éstas retrocedieran por la inercia en cada movimiento.

Los bosones vectoriales sólo viven durante el instante en que comunican su fuerza. Es como si el balón medicinal lanzado desde una barca desapareciera al ser cogido en otra. Un bosón vectorial llamado gluón es el causante de la interacción nuclear fuerte, mientras que el fotón, la partícula sin masa que constituye la luz cuando se encuentra fuera del átomo, es el responsable del electromagnetismo.

En los casos del electromagnetismo y de la interacción nuclear fuerte, los bosones se comportan como si fueran pelotas lanzadas entre varios malabaristas, de forma que, mediante este intercambio, los malabaristas permanecen unidos entre sí al tiempo que se transmiten energía unos a otros. Dos partículas denominadas W y una conocida como Z, son las que transmiten la fuerza que produce la desintegración radiactiva. Fueron descubiertas en 1983 por un equipo dirigido por Carlo Rubbia en el CERN (siglas francesas del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear, localizado en Ginebra).

La gravedad, la otra fuerza que existe en el Universo y la más débil de las cuatro conocidas, tiene un poder 10^{38} veces menor que el de la interacción nuclear fuerte. Se cree que existe un bosón vectorial, aún sin descubrir, que es el que produce la gravedad, una fuerza que no ejerce ningún efecto detectable en el interior del átomo, pues sólo actúa sobre grandes masas.

Durante la pasada década comenzaron a aparecer las primeras grandes teorías unificadas con las que se intentaba demostrar que las tres fuerzas subatómicas constituían los componentes de una única interacción fundamental. Sin embargo, ninguna de estas teorías incluía a la gravedad.

Sheldon Glashow, que se hizo acreedor de un Premio Nobel colectivo por sus trabajos sobre las grandes teorías unificadas, me dijo en cierta ocasión: «Pensamos que en el momento de máximo calor del Universo todas las fuerzas pudieron estar unidas en una sola. Esta fuerza fundamental y aparentemente mágica es la que ahora estamos intentando descubrir.»

Hawking comparte esta opinión: «La unificación de las cuatro fuerzas en una única explicación matemática constituye la búsqueda más grande de toda la ciencia.»

Al preguntarle sobre la forma en que pensaba realizar esta búsqueda y sobre sus objetivos personales al respecto, me contestó con un tono repentinamente solemne: «Mi objetivo

es sencillo; consiste en alcanzar una comprensión total del Universo, en descubrir por qué es como es y por qué existe.»

Garabateé estos pensamientos en un cuadernillo. Cuando levanté la cabeza vi que Hawking se estaba retorciendo de risa y que sus ojos brillaban de un modo peculiar.

«¿No le resultan familiares estas palabras?», me preguntó.

Tras un momento de reflexión comprendí lo que quería decir. El año anterior yo había escrito un artículo sobre Hawking que fue publicado en una popular revista científica norteamericana. En un lugar muy visible del artículo se citaban esas palabras de Hawking; la frase que había pronunciado algunos momentos antes era exactamente la misma que me había respondido cuando le entrevisté el año anterior.

No obstante, en la actualidad Hawking cree, al igual que la mayoría de los físicos teóricos, que el objetivo más difícil y oculto que puede buscarse se encuentra en los momentos más tempranos del Universo, en el período comprendido en la primera billonésima de segundo después del Big Bang. En ese momento, las cuatro fuerzas que vemos en nuestro Universo frío y estable estuvieron unidas seguramente en una sola. Esta idea se ha derivado del análisis de los sucesos que se produjeron en el inconcebible instante en que el Universo tenía una edad de unos 10^{-32} ó 10^{-33} segundos. Sin embargo, Hawking piensa que es necesario retroceder aún mucho más en el tiempo, hasta llegar a más de un factor de billón.

«Me gustaría conocer lo que sucedió exactamente entre los 10^{-33} y los 10^{-43} segundos», decía Hawking. «Es en ese punto donde se halla la última respuesta a todos los interrogantes sobre el Universo, incluida la misma vida.»

«La noción clásica del tiempo se desvanecería en algún momento anterior a ese punto (en algún momento comprendido entre los 10^{-33} y los 10^{-43} segundos). Hace poco escribí un artículo que se centraba en el tema del Universo en el momento de los 10^{-33} segundos, pero mi interés principal se encuentra más allá de ese punto. Realmente no creo que exista un auténtico modelo definido para ese momento. No hay nada que parezca dar una respuesta a algo tan remoto.»

Existen algunas reservas sobre la viabilidad de cualquier tipo de explicación acerca del comienzo del tiempo. La primera de ellas es que nadie estuvo allí para verlo. Cualquier teoría que pretenda describir el Big Bang constituye una enorme extrapolación a partir de la evidencia de que la expansión continúa produciéndose en la actualidad. Las radiaciones de fondo que atraviesan el Universo representan uno de los nexos de unión más importantes entre el hombre y la creación. Al igual que las brasas de una hoguera constituyen un indicio claro de que en ese punto ha existido algo caliente en algún momento anterior, las radiaciones de fondo muestran a los físicos cómo fue el Universo cuando se separaron la materia y las radiaciones. La uniformidad y omnipresencia de estas radiaciones demuestran que los modelos cosmológicos de un Universo homogéneo (o isótropo) son esencialmente correctos. La otra evidencia básica con que pueden operar los cosmólogos es la relación de 75% de hidrógeno y 25% de helio que existe en el Universo en la actualidad. Hawking y la mayor parte de los físicos piensan que esta proporción se produjo a los pocos minutos del nacimiento del Universo.

Pregunté a Hawking por qué los científicos estaban tan seguros de haber empezado por fin a profundizar en los primeros momentos del Universo. ¿No podía suceder que los cosmólogos hubieran ignorado eras enteras del desarrollo del Universo, o que se hubieran equivocado gravemente en algunas observaciones básicas?

«Bueno, es posible», respondió. «Pero recuerde que nosotros siempre retrocedemos en nuestra visión sobre el tiempo a medida que podemos ver más lejos en el espacio por medio de telescopios. Cuanto más lejos miramos hacia el espacio, más nos aproximamos al comienzo del tiempo.»

«Pero eso», repuse, «¿no significaría la suposición de que todo lo que existe en todas partes es igual y actúa de la misma manera?».

«Efectivamente», contestó.

«¿Sugiere entonces que las leyes naturales que hemos descubierto en nuestra época han funcionado siempre en el Universo?», pregunté.

«Así es», afirmó Hawking.

«Pero, al hacer estas suposiciones, ¿no es posible que los científicos estén haciendo un ejercicio de profesión de fe que tiene más de metafísico que de científico?»

«A veces se hacen suposiciones arriesgadas al profundizar en el comienzo del Universo, pero la mayoría de los hechos comprobables, como el de las radiaciones de fondo, parecen confirmar dichas suposiciones. Hasta el momento no hay ninguna razón para pensar que nuestros cálculos sean incorrectos en algún aspecto básico.»

De hecho, las observaciones realizadas en el espacio y en el interior de los potentes aceleradores han esbozado un notable y consistente guión sobre el viaje hacia el inicio del tiempo. En este viaje hacia atrás hay algunas paradas de gran importancia, especialmente buscadas por los teóricos para examinar en detalle los acontecimientos que se producen en ellos.

La primera de estas paradas tuvo lugar cuando el Universo tenía mil millones de años de edad. Los astrofísicos piensan que fue entonces cuando comenzaron a formarse los quasars (los objetos más distantes del firmamento, según se cree en la actualidad). La manera en que se formaron sigue siendo uno de los temas habituales de las conferencias cosmológicas, aunque la opinión generalizada es la de que en esa época el Universo comenzó a adoptar el aspecto que hoy nos es familiar, caracterizado por la profusión de puntos brillantes en un cielo negro.

La siguiente parada se produjo hace unos diez mil millones

de años, cuando la edad del Universo era sólo de 500.000 años. Fue entonces cuando las partículas elementales se unieron para constituir los átomos. Antes de ese momento el Universo era aún demasiado caliente como para permitir que un electrón entrara en órbita cuántica alrededor de un núcleo; el Cosmos era un mar hirviente formado por núcleos y electrones libres.

Los físicos han podido determinar este momento debido a que conocen con exactitud la cantidad de fuerza electromagnética que se necesita para que un electrón quede unido al núcleo de cualquier átomo de un elemento. Sólo hace falta convertir esta fuerza a su equivalente en temperatura y ver en qué momento se produjo el paso del Universo por esta fase en su proceso de enfriamiento. Este paso tuvo lugar medio millón de años después de su nacimiento.

Según Hawking, «cuando los átomos comenzaron a formarse, la materia pudo condensarse en galaxias y estrellas, y la gravedad comenzó a representar un importante papel en el desarrollo del Universo». En este momento fue también cuando la luz comenzó a tener capacidad para desplazarse a través del Universo.

La siguiente parada en el viaje hacia el pasado es la de los 100.000 años. Los dos ingredientes principales del Universo son la materia, de la que están compuestas las galaxias, las estrellas, los planetas y las personas, y la radiación de la que están hechas las microondas de fondo. En la actualidad las radiaciones de fondo y la materia apenas tienen ninguna interacción entre sí.

En cambio, en las edades tempranas del Universo (cuando la densidad y la temperatura eran mucho más elevadas que ahora), la materia y las radiaciones mantenían una intensa interacción. Los físicos teóricos creen que los fotones de las microondas de fondo estuvieron unidos efectivamente con los protones, neutrones y electrones que componen la

materia. A medida que el Universo se enfriaba, la radiación y la materia se escindieron, hecho que se produjo 100.000 años después del Big Bang. Las microondas de fondo descubiertas por Arnold Penzias y Robert Wilson en 1964 son un vestigio del momento en que la radiación se separó de la materia.

Según los teóricos, la siguiente parada se encuentra en la infancia del Universo, unos tres minutos después del tiempo cero. «Éste es un momento importante», decía Hawking. «Antes de estos tres minutos el Universo tenía demasiado calor como para permitir que los protones y neutrones se unieran en un núcleo. Al cumplirse los tres minutos es cuando tenemos que comenzar a observar con mucho cuidado la interacción nuclear fuerte.»

Si un protón y un neutrón se hubieran unido durante los primeros tres minutos, las colisiones con los fotones de las radiaciones cósmicas o con otras partículas los hubieran separado violentamente. En cambio, al cumplirse los tres minutos, el enfriamiento era suficiente como para que la interacción fuerte pudiera juntar a un protón con un neutrón o a un protón con dos neutrones para formar un núcleo de hidrógeno pesado.

Al mismo tiempo, aproximadamente, se crearon los núcleos de helio a partir de la unión de dos protones con uno o dos neutrones, siendo entonces cuando quedó establecida la proporción de 75% de hidrógeno y 25% de helio que ha existido hasta hoy. En este hito de los tres minutos se formaron también otros elementos ligeros, pero tendrían que pasar aún millones de años hasta que los elementos pesados como el hierro y el oro comenzaran a forjarse en los hornos de las estrellas.

La imagen de los tres minutos es muy clara. Los efectos de la interacción fuerte, ahora dominante, se comprenden bien. Las condiciones existentes en ese momento pueden reproducirse casi exactamente incluso en aceleradores de tamaño medio.

En el período anterior a los tres minutos el Universo entró básicamente en una fase de enfriamiento. Una centésima de segundo después del tiempo cero el Universo tenía tanto calor (cerca de 200.000 millones de grados Celsius), que se crearon y se destruyeron cientos de tipos de partículas en medio de la energía generada por las colisiones. Este hito de la centésima de segundo es importante en el sentido de que los físicos están seguros de haber seguido correctamente todos los pasos hasta ese momento.

«El camino es claro», decía Hawking. «Hay muy pocos puntos de controversia hasta llegar a la centésima de segundo.»

A partir de este punto, los cosmólogos, en su búsqueda de la historia perdida del Universo, se han visto obligados a confiar en el trabajo de los físicos experimentales, cuyos aceleradores de partículas son totalmente capaces de crear condiciones similares a las de entonces. Dicho con otras palabras, incluso un acelerador de tamaño medio podría reproducir la energía existente en el Universo en ese momento.

Entre una diezmilésima (10^{-4}) y una millonésima (10^{-6}) del primer segundo se encuentra otro momento crucial. Fue entonces cuando se crearon los componentes básicos de la materia en forma de quarks combinados en grupos de tres y formando neutrones y protones. Antes de eso, el Universo era una bullente sopa de quarks cuya excesiva energía y densidad les impedía formar nucleones.

Los físicos utilizan de hecho el concepto de "sopa de quarks" para superar ciertos problemas teóricos a los que tienen que enfrentarse al llegar a este punto. A los 10^{-4} segundos la densidad del Universo es tan grande que la cantidad de espacio existente entre todos los protones y neutrones es tan pequeña como el tamaño de una de estas mismas par-

tículas. Es una distancia demasiado pequeña para contentar a los físicos, que se han visto obligados a realizar una nueva descripción del comportamiento de las partículas subatómicas para explicar esta densidad.

Afortunadamente para ellos, una de las propiedades de la interacción fuerte, que mantiene unidos a los nucleones en el interior del núcleo atómico, es que esta fuerza se incrementa con la distancia. Cuanto más cerca se encuentran las partículas, menor es la fuerza. Este hecho se verifica tanto en los protones y neutrones como en los quarks que los componen.

De esta forma, los físicos han desarrollado un modelo en el que el Cosmos denso de los primeros momentos sería una mezcla de partículas muy juntas que no interactúan entre sí; es el modelo conocido como la sopa de quarks, según el cual la temperatura aumentaría progresivamente hasta llegar al tiempo cero. Si el modelo es correcto, ello significaría que la temperatura sigue aumentando después de la barrera de Planck (el momento en que el Universo tiene 10^{-43} segundos de existencia), más allá de la cual dejan de funcionar los cálculos de los físicos.

Otros modelos proponen lo que se conoce como Big Bang frío. Esto no significa que el Universo comenzara con una explosión fría, sino con la expansión de un espacio que no tenía que ser necesariamente más caliente en su inicio que una billonésima de segundo más tarde. En este tipo de modelo no tienen por qué intervenir los quarks. En lugar de eso, sus defensores sugieren que el número de partículas elementales se incrementaría sin ninguna limitación aparente a medida que nos aproximáramos al inicio del Universo.

Esto parece una paradoja. Históricamente el Universo siempre ha estado enfriándose, y lo sigue haciendo en la actualidad. Al retroceder en los tiempos remotos, el Universo tendría que incrementar su calor hasta el momento de la singularidad inicial. Sin embargo, los modelos que acabamos de

citar sostienen que la energía sustancial de los primerísimos instantes del Universo dio lugar a la creación de un número cada vez mayor de grandes partículas, de forma que en el principio del tiempo se habría producido un Big Bang relativamente frío.

En la actualidad el modelo de la sopa de quarks goza de mayor prestigio entre los teóricos que el del Big Bang frío, aunque, como dice Hawking maliciosamente: «La opinión de los teóricos puede cambiar, y lo suele hacer muy a menudo.»

En los primeros 10^{-10} segundos de su existencia, el Universo había crecido ya hasta alcanzar el tamaño de nuestro sistema solar, lo que supuso una colosal expansión de energía. No obstante, mediante la producción artificial de colisiones entre un pequeño número de protones y antiprotones, los aceleradores terrestres pueden reproducir el calor o nivel de energía que tuvo el Universo una millonésima de segundo después de su nacimiento.

En este momento se encuentra una de las cuestiones más importantes que preocupan a los físicos. Es aquí donde los teóricos comenzaron a ver por vez primera la unificación de las cuatro fuerzas que hoy dominan el Universo. Antes de este momento, según una teoría desarrollada por Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, la fuerza electromagnética que controla a los leptones y la interacción débil que produce la desintegración nuclear, fueron una misma cosa.

«Si estos cálculos son ciertos», afirmaba Hawking, «entonces sólo había tres fuerzas en el Universo antes de los 10^{-10} segundos: la combinación formada por el electromagnetismo y la interacción débil, la interacción nuclear fuerte y la gravedad. Esta hipótesis podría sugerir que hubo un origen común para todo lo que hoy vemos en el Universo.»

La teoría unificada de Weinberg, Glashow y Salam puede comprobarse en los aceleradores más grandes que existen en la Tierra. En 1982 y 1983 un equipo dirigido por Carlo Rub-

bia utilizó el gran colisionador de protones y antiprotones del CERN, en Ginebra, para producir unas partículas W y Z cuyas características eran prácticamente las mismas que había previsto la teoría unificada.

Visité el CERN en la época en que el equipo de Rubbia estaba consiguiendo las primeras partículas W. El nivel de energía producido en el acelerador (el más poderoso de la Tierra en la actualidad) superaba los 100.000 millones de voltios electrónicos, lo que supone una temperatura de 1.000 billones (10^{15}) de grados. Ésta es aproximadamente la misma temperatura que tuvo el Universo a los 10^{-12} segundos de su existencia.

La excitación creció y se hizo contagiosa en la sala de control del CERN cuando las señales de las partículas pesadas comenzaron a aparecer en las terminales de las computadoras. «Hemos estado persiguiendo estas pequeñas entidades durante años», me dijo Rubbia. «Ahora están empezando a aparecer en nuestra trampa, que ha sido cuidadosamente preparada. Si son lo que pensamos, éste será un hito en la historia de la física experimental.»

A partir de este punto, los teóricos se quedaron solos en su viaje retrospectivo. Aunque se están construyendo aceleradores más grandes, en la actualidad no hay ninguna instalación en la Tierra que pueda reproducir las temperaturas de los primeros instantes del Universo, y por tanto, ya no será posible verificar las especulaciones teóricas mediante pruebas experimentales.

En los 10^{-20} segundos llegamos al lugar en el que Hawking piensa que pudieron formarse los pequeños agujeros negros. Estos mini-agujeros, que según Hawking se encuentran en la actualidad por todo el Universo, constituyen el punto en el que los físicos deben comenzar a observar por vez primera los efectos cuánticos en términos de gravedad.

«Este fenómeno no debe ser demasiado abundante», decía Hawking, «pues de otro modo tendríamos que detectar muchos rayos gamma, y no es así. En nuestra Galaxia su proximidad no puede ser mayor que la distancia entre la Tierra y Plutón. Por otra parte, el efecto gravitatorio de la Galaxia podría hacer que la densidad del pequeño agujero negro fuera mayor en el interior de la misma que fuera.»

En los 10^{-32} segundos el tamaño del Universo apenas alcanza el de una pelota, y su temperatura es de 10^{27} grados Kelvin. Un microinstante antes (a los 10^{-35} segundos) se encuentra la última parada del camino retrospectivo en la que los físicos pueden tener aún alguna confianza en la veracidad de sus ideas sobre la historia del Universo inicial. La fracción de segundo que queda hasta la singularidad es un *billón* de veces más pequeña que el tiempo que tarda la luz en cruzar un protón.

Los físicos que defienden las grandes teorías unificadas piensan que en el instante de los 10^{-35} segundos, la interacción fuerte estuvo unida a las otras dos fuerzas subatómicas (electromagnetismo e interacción débil). Estas teorías unificadas intentan describir al Universo en este instante de la historia cósmica, cuando su tamaño era sólo de 10^{-24} cm y su energía pura estaba comenzando entonces a condensarse en partículas diminutas tales como los quarks y los leptones. En ese momento, la materia y la antimateria existían en cantidades casi iguales.

La barrera temporal de Planck se encuentra en los 10^{-43} segundos. En este punto se agota la capacidad de los físicos para describir el espacio, el tiempo o la materia. Se supone que un poco antes la gravedad había roto sus vínculos con la singular fuerza unificada que existió en el momento de la gran explosión; en cualquier caso, nadie sabe por qué no puede aplicarse la mecánica cuántica a la gravedad.

Para cruzar la barrera de Planck sería conveniente que los físicos supieran si las diversas GUTs están realmente sobre la

pista. Sin embargo, no existe ninguna forma segura de comprobar estas teorías por medio de los aceleradores con los que hoy contamos. No es posible reproducir los elevadísimos niveles de energía de aquel momento de la historia cósmica, por lo que será necesario desarrollar nuevas técnicas experimentales.

«Si las GUTs son correctas, entonces lo único que queda fuera es la gravedad», decía Hawking. «Pero yo no estoy totalmente convencido de que esas GUTs sean el modelo correcto.»

«Además, como usted sabe», continuó, «existen algunos problemas importantes en relación con el modelo convencional del Big Bang, y las diversas GUTs no dibujan una imagen necesariamente consistente del mismo.»

En primer lugar está el persistente problema del monopolo magnético, una escurridiza partícula que, según casi todas las GUTs, tendría que haber salido al espacio en el instante mismo de la barrera de Planck. Las teorías que explican la creación y el predominio de la materia también han llegado a la conclusión de la existencia de estos monopolos. Se trataría de polos magnéticos libres, similares al polo norte o al polo sur de un imán corriente.

Blas Cabrera, físico de la Universidad de Stanford, pretende haber encontrado la prueba de que estos monopolos, que constituyen un tipo de materia totalmente nuevo, existen de hecho en la actualidad. No obstante, su trabajo aún no ha sido constatado por otros científicos.

Otro asunto preocupante es el hecho de que la radiación de microondas de fondo es demasiado uniforme. Si esta radiación se liberó efectivamente al separarse de la materia, unos 100.000 años después del inicio del Cosmos, ¿cómo se explica esta homogeneidad en zonas tan distintas del Universo? En ese momento las diversas partes del firmamento se habrían distanciado ya a millones de años luz en el espacio.

Si no había ninguna posibilidad de intercambio entre zonas tan separadas, ¿por qué se ha detectado en todas partes la misma temperatura cósmica?

La barrera de Planck sigue manteniéndose. No existe ninguna esperanza inmediata de traspasar esta última frontera, más allá de la cual podría existir un Universo autoexplicativo de extremada sencillez.

«En este punto el campo gravitatorio sería tan intenso que, por definición, tendría que estar sujeto a los efectos cuánticos», decía Hawking. «Si queremos comprender el comienzo del Universo, tendremos que comprender la combinación entre la mecánica cuántica y la gravedad.»

«La barrera de Planck representa el punto final de nuestra capacidad para describir el espacio y el tiempo a partir de la teoría clásica de la relatividad. Es por eso por lo que no sabemos cuantificar la gravedad.»

En cierto sentido, el motivo de que los científicos no hayan conseguido atravesar la barrera de Planck, aunque se hayan aproximado mucho, es que quizá hayan intentado ajustar sus ecuaciones para poder retroceder artificiosamente hasta los momentos cruciales del desarrollo del Universo. Es lo que ocurrió, por ejemplo, en los 10^{-4} segundos, cuando se decidió que podían pasarse por alto las interacciones entre los neutrones y protones comprimidos con gran densidad.

La barrera de Planck es el fin de nuestro retroceso en el Universo: ahí se acabaron las explicaciones por medio de ecuaciones y los saltos sobre los puntos demasiado complejos e incomprensibles. Ahí es donde todos nuestros cálculos y pensamientos deben unirse de nuevo a las grandes dudas que ha tenido el hombre sobre el Cosmos antes de saber cómo comenzó, cosa que aún no conocemos con exactitud.

8. ¿Burbuja o explosión?

El Big Bang ha constituido el *modus operandi* de la creación del Universo para una generación de físicos. Sin embargo, en cualquier conferencia actual sobre cosmología no se oye hablar de otra cosa que de burbujas y del Universo inflacionario.

Los teóricos nunca se han sentido demasiado a gusto con algunas de las artificiosas conjeturas que explican el Big Bang como una explosión cataclísmica en la que surgieron y estallaron en todas direcciones la materia y las fuerzas para constituir un Universo que aún se encuentra en expansión. La singularidad inicial resulta molesta para algunos de estos teóricos, y la mayoría de ellos piensa que el Big Bang no explica adecuadamente la uniformidad de las radiaciones de fondo; sería algo así como si estallara una bomba arrojando sus esquirlas en una esfera perfecta. Del Big Bang se deriva también una hipótesis sobre la naturaleza del espacio en el Universo, según la cual se supone que este espacio se parece más a una plataforma que a la superficie de una esfera, lo que explicaría la apariencia plana del Universo.

Hawking señala que «la idea de que el Universo comenzó como una burbuja ofrece una solución sencilla a muchos de estos problemas». La teoría de la burbuja, formulada en 1981, suprime muchas de las imperfecciones de la del Big

Bang, aunque, por supuesto crea otros problemas. La idea básica es que fueron varios, y no uno solo, los universos que se formaron a partir de una serie de burbujas que se hincharon como balones en el vacío. En los momentos iniciales existía una mezcla desigual de puntos llenos de energía, cada uno de los cuales tenía un calor superior a mil cuatrillones de grados. A causa de su propio calor, estos puntos se expandieron de una forma tan rápida que pronto comenzaron a "sobreenfriarse".

Esto sucedió en algún momento posterior a la barrera de Planck, en los 10^{-43} segundos, cuando la gravedad se había liberado ya de las tres fuerzas cuánticas. Las regiones sobreenfriadas tenían una propiedad especial, denominada "falso vacío" por el físico de Harvard, Sidney Coleman, que les permitía atraer la energía del campo gravitatorio circundante. Unos 10^{-35} segundos después de que comenzara el proceso, las regiones sobreenfriadas experimentaron un enorme golpe de energía, relacionado quizá con un choque de gravedad negativa, y constituyeron una serie de burbujas destinadas a convertirse en universos independientes.

El "falso vacío" es la clave de esta concepción, que se ha comparado a una cantidad de agua que se enfriase hasta el punto inmediatamente inferior al de la congelación. El agua podría mantenerse durante un instante en estado líquido hasta el momento en que se cristalizara con rapidez en hielo. Este proceso es el mismo que se había verificado en las regiones sobreenfriadas del Universo, las cuales se mantuvieron en un estado inalterable durante un instante.

Cuando las burbujas creadas a partir del golpe del falso vacío comenzaron a enfriarse de nuevo, la combinación formada por la interacción débil y el electromagnetismo se separó y ambas fuerzas adoptaron identidades independientes. La energía interna de una de estas burbujas (nuestro Universo), comenzó entonces a condensarse en partículas como los

leptones y los quarks. Al final de esta época de inflación (10^{-32} segundos después del comienzo), nuestro Universo, con toda la materia de las estrellas, las galaxias, los planetas y las personas que hoy lo habitan, tendría el tamaño aproximado de un pomelo. En este punto es donde comenzaría el esquema normal del Big Bang.

En la actualidad los físicos sienten un gran interés por conocer la evolución de la burbuja. En primer lugar, durante la época de la inflación del Universo, las burbujas se desarrollaron de un modo más lento que en el esquema del Big Bang. Esto favoreció el hecho de que la materia se desarrollase en el tiempo suficiente para mezclarse de forma homogénea, alcanzar la misma temperatura y, por tanto, producir una radiación uniforme a través del Universo.

Al basarse en leyes naturales más que en conjeturas arbitrarias, la teoría de la burbuja explica también el aspecto plano de nuestro Universo. Cuando la burbuja crece hasta alcanzar el tamaño del Universo actual, dicha burbuja se extiende de forma que la superficie de una gran esfera como la Tierra adopta una apariencia plana.

¿Qué problemas quedan aún por resolver en la evolución de la burbuja? Los astrofísicos no están totalmente seguros de entender la forma en que las galaxias y las estrellas se condensaron en grupos de materia en el interior de la burbuja que se iba a convertir en nuestro Universo. Además, algunos físicos se muestran preocupados por la noción de una multitud de universos creados al mismo tiempo.

¿Llegaremos a estar seguros alguna vez de este hecho? Los físicos no se ponen de acuerdo en este punto. Por lógica, habría que pensar que los universos, expandiéndose del mismo modo en que lo harían unas burbujas en una masa de pan en fermentación, nunca llegarían a encontrarse entre sí; sin embargo, algunos teóricos inconformistas sostienen con fervor que cuando la expansión disminuyera y se detuviera,

algunos de los universos individuales podrían llegar a converger.

«La inflación explica el hecho de que la expansión del Universo fuera armoniosa durante este período», aclaraba Hawking. «En primer lugar, ello permitió que el Universo se expandiera en lugar de contraerse sobre sí mismo como un agujero negro. Por otra parte, la materia pudo haberse propagado con la suficiente dispersión como para formar las galaxias.»

Manifesté mi curiosidad sobre el problema del Universo en el momento de la singularidad, el «comienzo del Universo» según el lenguaje de Hawking. ¿Contribuiría la teoría de la burbuja a eliminar la singularidad que tanto preocupa a los físicos teóricos?

«Bueno, es posible construir un modelo cosmológico a partir de una burbuja en el que no existiera la singularidad», me respondió. «Pero realmente no creo que dicho modelo pudiera explicar el hecho de la singularidad en una contracción gravitatoria, ni que pudiera ignorar la singularidad de los agujeros negros.»

«En resumen, no creo que la teoría de la burbuja pueda prescindir de la singularidad inicial, aunque es posible», dijo con su inseguridad característica.

Uno de los físicos que han estado estudiando el Universo-burbuja es J. Richard Gott, un joven astrofísico de Princeton, que ha propuesto la hipótesis de que el nuestro podría ser uno más entre un número infinito de universos creados a partir de burbujas en el interior de un líquido de intensa, aunque finita, densidad. Sus cálculos indican que cada uno de estos universos está "abierto" en sí mismo, es decir, que su expansión es infinita y continuará aumentando siempre.

Estas burbujas se constituyen en el interior de un tipo de espacio bautizado con el nombre de Willem de Sitter, que inició su estudio en 1917. Se trata de una solución original a las

ecuaciones específicas de la relatividad general de Einstein, en la que se describe un Universo curvo e infinito en estado de perpetua expansión. De Sitter añadió a su solución una constante cosmológica referida a una especie de fuerza repulsiva universal o gravedad negativa. En la expansión universal definida por De Sitter, cualquier punto del Cosmos tiende a separarse de otro punto en una proporción constante y creciente.

En la versión del Universo-burbuja de Gott, la burbuja inicial se constituye de modo uniforme en el interior del espacio circundante de De Sitter. Durante el proceso se eliminaba la singularidad inicial. Según Gott, la uniformidad general del Universo sólo pudo producirse si en el período inicial de la expansión todas las partes del Cosmos hubieran estado relacionadas entre sí de forma directa o causal, aunque sólo fuera durante un instante.

Según el modelo cosmológico normal del Big Bang, las partes del Universo inicial no tuvieron una relación causal entre sí debido a que la distancia que las separaba era demasiado grande como para que la luz pudiera viajar entre ellas cuando comenzó la colosal expansión. Esto siempre ha constituido un motivo de preocupación para los cosmólogos. En el modelo de Gott, al igual que en la cosmología del Universo inflacionario, existió una breve fase de densidad constante en la que todas las partes del Universo pueden establecer relaciones causales entre sí, lo que permitió la igualación de las partes diferenciadas y la creación de un Cosmos homogéneo.

Sin embargo, un aspecto peculiar de la cosmología de Gott es su aplicación de la radiación Hawking al Universo inicial. Al estudiar la interacción entre la gravedad y la mecánica cuántica, Gott llegó a la conclusión de que los horizontes eventuales que rodean los agujeros negros generan una radiación térmica continua. Según sus estudios, gracias a la radiación Hawking es posible explicar la existencia de las ra-

diaciones de fondo que se esparcen de modo uniforme a través del Universo.

Hawking y otros estudiosos han podido demostrar ya que la radiación de los horizontes eventuales de los agujeros negros constituye sólo un aspecto específico de un profundo teorema, según el cual allí donde hay un horizonte eventual se produce una emisión de radiación térmica. Esto significa que en el límite de cualquier región de la que no pueda escapar la luz (el borde de un agujero negro o la frontera de un Universo) siempre existirá algún tipo de radiación térmica.

Gott sostiene que una de las características más importantes del espacio de De Sitter es que éste se encuentra repleto de horizontes eventuales y radiación Hawking. La expansión creciente (en realidad, exponencialmente creciente) es la que crea todos estos horizontes eventuales. Si dos puntos comienzan a separarse con la suficiente rapidez como para impedir que un rayo de luz procedente de uno de ellos alcance al otro, un horizonte eventual surgirá entre ambos.

Hawking y Gary Gibbons, su antiguo alumno y compañero de trabajo, habían calculado ya la relación entre la radiación Hawking y estos peculiares horizontes eventuales, pero Gott dio un paso más definitivo.

A partir de los resultados de Hawking y Gibbons, que describían matemáticamente la densidad energética de la radiación en términos de la expansión del Universo inicial, Gott añadió un factor adicional por el que esta densidad energética adquiriría consistencia y homogeneidad. En términos matemáticos, esta constante equivalía más o menos a llenar el espacio de De Sitter con un fluido de densidad uniforme. Sin embargo, este fluido de Gott, tenía una presión negativa, descrita por su creador como una succión universal.

Gott afirma que los resultados de los últimos cálculos realizados en la teoría del campo cuántico demuestran que la radiación Hawking podría actuar exactamente de esta peculiar

manera siempre que se dieran ciertas condiciones, como las que se dieron durante la expansión del espacio de De Sitter en su primera fase.

El resultado de sus cálculos es interesante. Los horizontes eventuales generan radiación Hawking, la cual se transforma a su vez en el fluido que origina la expansión del Universo-burbuja; la constante de Gott (o el fluido de la radiación Hawking) es lo que causa la expansión exponencial del espacio de De Sitter y, por último, este espacio genera los horizontes eventuales.

Esta tesis circular sólo se verifica cuando la radiación Hawking contiene un enorme calor (más de 10^{31} grados Celsius) y una increíble densidad (proporciones inconcebibles, como 10^{93} gramos de materia por centímetro cúbico). Gott está totalmente convencido de que estos niveles extremos de calor y densidad constituyen las condiciones adecuadas para que el comportamiento de la gravedad comience a parecerse al de un campo cuántico (el punto en el que la gravedad se cuantifica).

Gott ha incluido una época inflacionaria en su teoría de la burbuja. En esta fase de transición la materia experimenta una sutil transformación. Gott sugiere, por ejemplo, que los quarks podrían adquirir, de forma relativamente fácil, una masa que anteriormente no tenían. Durante este período, la radiación Hawking penetra en la burbuja desde el espacio de De Sitter en expansión y, en un instante de 10^{-42} segundos, se transforma en materia normal. En esta rapidísima conversión de radiación en materia es donde Gott cree que los astrofísicos actuales parecen reclamar la existencia del Big Bang.

La radiación Hawking generada por los horizontes eventuales en el nuevo Universo constituye, por tanto, el origen de toda la materia y la energía del Cosmos actual. La uniformidad natural de la radiación Hawking en el espacio de De

Sitter explica la gran homogeneidad de las microondas de fondo y del propio Universo.

La parte más arriesgada del modelo de Gott es la que intenta explicar lo que sucedió al otro lado de la barrera de Planck (a 10^{-44} segundos o antes). Gott sugiere que durante este período pudieron haberse formado otros universos en un número infinito, como burbujas espumeantes en un vaso de cerveza.

Desgraciadamente, nunca podremos observar ninguno de estos otros universos. Cada uno de ellos se encuentra separado de los demás por un horizonte eventual, la barrera de la luz que impide la transmisión de cualquier clase de información entre ellos.

La esencia de toda teoría científica es que sus hipótesis deben ser comprobables. Podría decirse asimismo, como consecuencia de lo anterior, que dichas hipótesis deben ser también refutables. En cualquier caso, no sabemos cómo podrían comprobarse o refutarse las especulaciones de Gott sobre las burbujas espumeantes que forman un número infinito de universos.

En primer lugar, se necesita un trabajo mucho más intenso que el realizado hasta ahora para determinar de forma precisa el comportamiento de las burbujas en el espacio de De Sitter, lo cual aportaría al modelo un marco teórico más elaborado. Desde un punto de vista práctico, Gott afirma que las observaciones astronómicas mejores y más completas deben centrarse en las características generales del Universo y en su comportamiento.

La mayoría de los astrofísicos piensan que las galaxias y conglomerados estelares no pueden haber constituido nunca un Universo totalmente homogéneo. No obstante, la teoría de Gott indica la necesidad de un Universo de tales características en el instante siguiente a su nacimiento. A lo largo de la historia del Universo debieron desarrollarse diversas alteraciones casuales en algunos de sus puntos. Gott cree que una observación más profunda del firmamento podría explicar estas anomalías.

Me interesaba saber lo que pensaba Hawking acerca de la teoría de Gott. ¿Cuál era su opinión sobre la utilización de su radiación para explicar la existencia de toda la materia y la energía del Universo?

«En el espacio de De Sitter hay una radiación térmica, lo cual es muy importante para las burbujas», dijo Hawking. «Sin embargo, Gott no se dio cuenta del alcance total de este hecho.» A continuación se apresuró a defender sus propias teorías: «Gary Gibbons y yo fuimos los primeros en descubrir que existe una radiación térmica en el espacio de De Sitter. La razón de que suceda esto es que hay unos horizontes eventuales similares a los de los agujeros negros. Ello explica que esta radiación sea muy parecida a la de un agujero negro y, por consiguiente, similar a la radiación Hawking.»

Le pregunté cuál era entonces su opinión sobre los intentos de Gott de aplicar la radiación Hawking al Universo inicial.

«Bien», dijo con su habitual sonrisa maliciosa, «yo creo que Gott (no Dios*), ha sido tributario de una publicidad inmerecida. Muchas otras personas han sugerido ideas similares a las suyas, y a veces mucho antes que él. También hay algunos científicos que han desarrollado unos análisis más detallados sobre la mecánica por la que se producen las burbujas».

«Dos de ellos son Alan Guth, del Instituto de Tecnología de Massachussets, y el soviético Starobinskii», continuó Hawking. «En realidad, Starobinskii fue el primero que desarrolló el concepto de los universos-burbuja.»

* Juego de palabras con el nombre del científico Gott, y Dios (en inglés, "God"). *(N. del T.)*

Hawking se unió a la investigación sobre la explosión-burbuja a finales de 1981, cuando, atraído por lo que consideraba un excelente trabajo, emprendió un viaje a Rusia con el objeto de conocer lo que estaban descubriendo varios teóricos soviéticos sobre el Universo inflacionario. Allí tuvo ocasión de visitar a A. A. Starobinskii, A. D. Linde y otros científicos del Instituto de Física Lebedev de Moscú.

«Algunas de las versiones rusas sobre el Universo-burbuja eran realmente muy atractivas», me decía Hawking. «La idea básica en la que yo estaba interesado era muy simple.»

«El planteamiento esencial es que si se admite la existencia de las burbujas, es fácil pensar que exista más de una. Estas burbujas pueden chocar entre sí, lo cual daría lugar a un Universo no homogéneo, y esto no es lo que vemos en la actualidad.»

Linde había escrito un artículo en el que sugería la posibilidad de que una burbuja individual se constituyera sin que tuviera que formarse a su lado otra burbuja. Esta idea constituía el problema principal que deseaba investigar Hawking, el cual pasó muchas horas en Moscú discutiendo sobre ello con Linde. «Me marché de allí pensando que la versión de Linde era mejor que las de los demás teóricos rusos, pero me di cuenta de que su trabajo estaba equivocado en algún punto», decía Hawking.

Lo primero que hizo al volver a Cambridge fue reunirse con su colega Ian Moss con el objeto de elaborar un estudio destinado a remedar las imperfecciones de las teorías rusas.

«El problema del esquema de Guth era que de él se derivaba un Universo muy poco homogéneo y dominado por unas pocas burbujas de gran tamaño que se desarrollarían a partir de la fase inflacionaria», me decía Hawking. «Nosotros demostramos en nuestro análisis que, en ciertas circunstancias, un período inflacionario puede producirse de forma simultánea en todos los puntos del espacio del Universo inicial.

De este modo, no se producirían puntos no homogéneos.»

Hawking, que fue quien concibió la idea, y Moss, que se encargó de hacer los cálculos necesarios, desarrollaron esta solución mediante un proceso relativamente sencillo. «Los demás análisis habían desarrollado el problema del fin de la época inflacionaria como si se tratara de un espacio-tiempo plano», decía Hawking. «Habían ignorado la curvatura y el horizonte finito del Universo.»

«Nosotros demostramos que el espacio-tiempo en el que se produjo la era inflacionaria no era plano, sino curvo», continuó. «El resultado es que la época inflacionaria dio lugar al surgimiento de un Universo exento de los puntos no homogéneos del anteriormente descrito.» Este análisis proporcionaba una solución muy sencilla para un problema arduo, por lo que pronto despertó un gran interés entre los cosmólogos.

En junio de 1982, Hawking y Gary Gibbons organizaron un congreso en Cambridge para tratar el tema del primer segundo del Universo. Acudieron muchos especialistas: cinco cosmólogos de la Unión Soviética, entre los que se encontraban Linde y Starobinskii, junto con Guth y otros veinticuatro eruditos estadounidenses y europeos. Había un problema que atraía especialmente el interés de los asistentes.

El defecto fatal de todos los esquemas inflacionarios era que presentaba un modelo de Universo homogéneo a gran escala, pero poco uniforme a pequeña escala; el Cosmos contiene acumulaciones de materia en forma de galaxias y grupos de estrellas. En otras palabras, resulta difícil pensar que un Universo inflacionario pudiera producir las estrellas y galaxias que hoy vemos en nuestro Universo. Durante las tres semanas de trabajo los físicos se dividieron en distintos grupos (dirigidos por Hawking, Guth y Starobinskii, entre otros) para resolver este problema.

En su afán por probar y demostrar lo que se había comenzado a denominar como "nuevo Universo inflacionario",

los teóricos allí reunidos se concentraron en grupos de trabajo ante pizarras y terminales de computadora y en algún momento pensaron que habían dado con la solución al problema de la formación de las galaxias. Sus cálculos mostraban que el esquema inflacionario producía realmente la cantidad adecuada de acumulaciones de materia distribuidas de forma conveniente por el Universo.

Sin embargo, la conclusión matemática del esquema inflacionario indicaba que estas acumulaciones de materia se constituirían de forma prematura y se contraerían casi de inmediato en agujeros negros. Por eso, el modelo más sencillo del nuevo Universo inflacionario, en cuya creación había intervenido Hawking, entre otros, tuvo que ser declarado muerto de forma oficial cuando sólo tenía seis meses de vida.

«Bueno, al menos esto nos mostró el camino que teníamos que tomar, por lo que la conferencia no fue un fracaso», me decía Hawking. «Comprendimos también que aún nos quedaba una gran cantidad de trabajo por hacer.»

En cualquier caso, el Universo inflacionario es el que goza de mayor prestigio entre los cosmólogos. «Este enfoque parece ser el más acertado», señalaba Hawking. «Con él se resuelven más problemas de los que se crean.» Los teóricos se muestran especialmente atraídos por una de las consecuencias de la inflación, según la cual una explosión inflacionaria inicial había igualado a toda la materia del Universo inicial en una densidad adecuada para que dicho Universo se expandiera hasta el tamaño actual.

Un Universo joven con un crecimiento demasiado rápido habría dado lugar a una compresión demasiado densa de la materia, que podría haberse contraído sin más sobre sí misma, del mismo modo que un agujero negro. También podría haber ocurrido que la materia se hubiera esparcido con demasiada ligereza para agruparse en galaxias, lo que habría dado lugar a su dispersión por el espacio. La expansión del

Universo necesitó realmente una afinación muy precisa, lo que debió producirse en los 10^{-32} primeros segundos del período inflacionario.

Aunque nuestro Universo se encuentra aún en una fase juvenil, los teóricos se sienten atraídos por la investigación de su destino final. ¿Vivimos en un Universo abierto? ¿Continuará siempre su expansión actual, hasta que la dispersión de su materia produzca el paulatino apagamiento de las estrellas y galaxias? ¿O acaso vivimos en un Universo cerrado? Quizá un día el Universo comience a replegarse sobre sí mismo en una contracción cataclísmica inversa a la expansión del Big Bang, un "Big Crunch" (gran contracción), como ya se conoce entre los astrofísicos. Aunque el fin del Universo se encuentra aún a muchos miles de millones de años, quise conocer la opinión de Hawking al respecto.

«Realmente no pretendo conocer el final del Universo, ni tampoco lo hacen los demás», contestó. «Creo que la suposición más acertada es la de que ese final se encuentra precisamente en el límite entre la contracción y la expansión. Pero esto sólo es una suposición.»

«Existe un curioso modelo cosmológico que describe un Universo cuya expansión se realiza con la energía justa para evitar la contracción. Si tuviera que elegir un modelo, creo que escogería éste, pues es el más cercano al de la contracción.»

A continuación manifesté mi opinión de que la idea de la coexistencia de una serie de universos-burbuja parecía sugerir un tipo de Universo abierto cuya expansión continúa de forma indefinida hasta convertirse en algo infinitamente oscuro y frío.

«La idea de la coexistencia de numerosos universos no afecta al concepto de un Universo abierto», respondió Hawking. «Eso no puede considerarse como un problema clásico.

Habría que tomar en consideración la mecánica cuántica, con todas sus posibilidades.»

«Al hablar de la posibilidad de coexistencia de distintos universos, uno se adentra en un terreno peligroso, en un terreno metafísico. Creo que fue Wittgenstein quien dijo esto. Pasó la mitad de su vida en Cambridge y, si no me equivoco, afirmó que la existencia de otros universos no constituye un predicado lógico. Lo que quería decir es que no tiene mucho sentido decir que existen otros universos si éstos no producen ningún efecto que nosotros podamos observar.»

«En realidad, si podemos aplicar la mecánica cuántica al Universo, tendremos que imaginar un modelo en el que el Cosmos presente todo tipo de ramificaciones diferentes.»

«Estas regiones, reales y físicas, ¿podrían llegar a observarse?», pregunté.

«No, estas ramificaciones no serían regiones físicas», contestó. «Esto sólo significa que hay una probabilidad no absoluta de que el Universo tenga una gran cantidad de formas distintas, del mismo modo que hay una probabilidad de que dicho Universo sea abierto y una probabilidad de que sea cerrado.»

«Podría ocurrir», dijo con una clara expresión de placer por la especulación, «que nos encontremos en una ramificación singular del Universo, situada precisamente en el límite entre la posibilidad abierta o la cerrada. El aspecto más notable del Universo es que su situación está muy próxima al límite entre lo abierto y lo cerrado. Las probabilidades de que el Universo no esté en esta situación límite son enormes, pero se aproxima tanto a ella que somos incapaces de determinar en qué lado está».

Pensé que nunca podríamos saber si el Universo es abierto o cerrado. Seguramente las especulaciones nos conducirían a otras cuestiones más propias de la metafísica.

«Pronto dispondremos de los instrumentos necesarios»,

continuó Hawking. «El telescopio espacial nos permitirá determinar con precisión en qué lado del límite se encuentra el Universo. Tendremos la posibilidad de observar el espacio con una profundidad mucho mayor, y haremos un cálculo más seguro sobre la cantidad de materia existente en el Universo.»

«Pero podría ocurrir que siguiéramos sin poder decidirnos. Nos encontramos demasiado cerca del límite. Si el Universo se halla realmente en una situación de equilibrio perfecto entre ambas posibilidades, nunca llegaremos a conocer la verdad. No obstante, según indican nuestras observaciones actuales, cuando el telescopio espacial entre en funcionamiento podremos determinar con certeza si el Universo es abierto o cerrado.»

«¿Y qué sabremos entonces», repuse.

«El destino de los átomos de nuestros cuerpos.»

Me encontraba en la ladera del Mont Blanc, sobre la estación de esquí de Chamonix, en los Alpes franceses. El cielo era claro y azul, las primeras nieves del otoño cubrían las montañas y las hojas de los árboles empezaban a teñirse de vivos colores. Un pequeño camión Fiat salió del túnel que comunica a Francia con Italia por debajo del Mont Blanc. Saludé a Roger Antoine, funcionario del laboratorio acelerador del CERN, situado al oeste de Ginebra, y subí al camión. El vehículo giró en redondo y regresó en dirección a la montaña.

Hacia la mitad del túnel, de 12 km de longitud, el aire comenzó a enrarecerse debido al humo de los coches y al olor de gas-oil. En ese punto, al lado de la carretera, se encontraba un gran aparato construido en una cavidad de la roca. Su única función era la de comprobar una hipótesis: los protones, que son los habitantes más regulares y estables del Universo, ¿pueden vivir indefinidamente o se desintegran como

la mayoría de las demás partículas? Hace dos décadas la idea de la desintegración de los protones se habría considerado una herejía científica. En cambio, en la actualidad los científicos contemplan con gran seriedad esta concepción.

Este interés se debe a que una de las consecuencias de las diversas grandes teorías unificadas es que los protones, que antes se consideraban inmutables, llegarían a desintegrarse con el tiempo para formar otras partículas. El motivo de esta desintegración, según la teoría, es que la interacción fuerte que mantiene unido al protón y la interacción débil que origina la desintegración radiactiva fueron causadas en última instancia por la misma interacción básica, que se produjo durante un solo instante en los primeros 10^{-32} segundos de la vida del Universo. En consecuencia, el protón podría estar destinado a desintegrarse con el paso del tiempo, del mismo modo que un átomo radiactivo.

Las teorías prevén que, por término medio, cualquier protón tardaría un tiempo excesivamente largo (10^{30} años o más) en desintegrarse. Sin embargo, los investigadores piensan que es bastante fácil idear un experimento para comprobar lo que sucederá en un futuro remoto, en período de tiempo cuya longitud es mayor que la edad del Universo.

En un lugar situado tres kilómetros por debajo de la cima del Mont Blanc y protegido de los rayos cósmicos, que producirían una señal equívoca en el aparato, el físico italiano Picchi Pio me enseñó un experimento para medir la duración de la vida de un protón.

«Resulta evidente que no podemos esperar miles de millones de años para observar un protón y ver si desaparece», me decía Pio. «Pero podemos reunir 10^{30} protones y ver si se desintegra alguno durante un período determinado, como por ejemplo, un año.» Si la desintegración de los protones es un fenómeno natural, estadísticamente tendría que morir al menos un protón a lo largo del año.

Pio me enseñó su colección de protones. Se encontraban contenidos en una serie de planchas de hierro cuyo peso total alcanzaba las 150 toneladas. Pio y sus colegas estimaban que el número de protones de este montón de hierro era aproximadamente de 10^{32}, «el número exacto para un experimento adecuado».

En las planchas se han instalado 42.000 aparatos similares a contadores Geiger, cuya función es la de captar cualquier explosión de radiación emitida por la muerte de un protón. Los aparatos, llamados calorímetros, están conectados a una computadora. El trabajo de Pio y sus colegas de varias universidades italianas y del CERN consiste únicamente en observar y esperar ante la terminal de la computadora hasta que se produzca la señal correcta. A finales de 1982, cuando tuve ocasión de ver el experimento, habían aparecido ya en la pantalla de la computadora cuatro posibles señales.

Pio tenía la impresión de una de ellas registrada por la computadora. Los investigadores tenían razones para creer que aquella estela en forma de Y indicaba la descomposición de un protón en un tipo de leptón llamado muón, y en un electrón positivo o positrón; esta transformación habría originado una pequeña explosión de energía susceptible de ser captada por los calorímetros. Otra señal que me enseñó representaba la marca de un neutrino que, en su opinión, había atravesado la Tierra de parte a parte antes de llegar al túnel del Mont Blanc.

En la actualidad se están invirtiendo millones de dólares en experimentos similares en la India, Ohio, Minnesota, Dakota del Sur, Utah y Japón, con el objeto de averiguar la duración de la vida de los protones. En su mayor parte, estos experimentos no han dado resultados definitivos, aunque los investigadores de la India afirman tener al menos ocho ejemplos de desintegración de protones. Si se comprobara con certeza que los protones se desintegran, ello vendría a demostrar que las

grandes teorías unificadas se encuentran en el camino correcto. Además, los científicos tendrían la prueba de que el Universo es intrínsecamente inestable, puesto que los protones son los principales elementos constitutivos de la materia.

Hawking mantiene su escepticismo al respecto.

«Nunca descubrirán la desintegración del protón», me dijo con franqueza en su estudio. «Si lo hicieran, ello significaría que hay algún error en el experimento. En mi opinión, la vida de un protón es un poco más larga de lo que ellos piensan. Ellos están trabajando sobre la suposición de un período comprendido entre los 10^{30} y los 10^{33} años. Es lo mejor que pueden hacer por el momento. Según mis estimaciones este período sería algo más largo que los 10^{33} años, en cuyo caso, sería imposible comprobar el experimento.

«Parece usted muy seguro», observé.

«Admito que si las ecuaciones más sencillas de los grandes modelos unificados son correctas, se podría descubrir la desintegración del protón», repuso. «Pero se pueden elaborar grandes modelos unificados en los que la duración de los protones sea mucho mayor de 10^{33} años, lo que haría imposible tal descubrimiento.»

«Por otra parte, tanto en la actualidad como en el futuro, será imposible distinguir la desintegración de un protón de otros fenómenos causados por los neutrinos. Estos fenómenos son distintos a la desintegración del neutrón, pero se parecen mucho.» Me acordé del neutrino de Picchi Pio, el que había atravesado la Tierra, y de su semejanza con la señal de la supuesta agonía mortal de un neutrón.

«Existe también otra clase de desintegración de protones causada por los pequeños agujeros negros», añadió Hawking. «El tamaño de estos pequeños agujeros es menor que el de los protones. Sin embargo, en este caso, la vida de los protones dura más de 10^{45} años, por lo que no podría medirse con nada.»

El desinterés de Hawking hacia los experimentos de los investigadores sobre los protones podría asimilarse a la característica desconfianza entre los científicos teóricos y los experimentales. Hawking insiste en negarlo: «No estoy en contra de los físicos experimentales, sino en contra de sus métodos.»

«Sin embargo», concluyó, «si llegara a demostrarse alguna vez la desintegración del neutrón, ello daría lugar a especulaciones muy interesantes.»

9. El principio antrópico

Las primeras informaciones sobre el Big Bang fueron acogidas rápidamente por numerosos grupos religiosos. Al conocerse el hallazgo de este Génesis científico, el Papa Pío XII declaró en 1951: «La verdadera ciencia camina progresivamente hacia el descubrimiento de Dios, como si la Providencia se encontrara esperando detrás de cada puerta abierta por la ciencia.» Son bastantes los científicos que piensan que las realidades que están descubriendo poco a poco sobre el Big Bang podría sugerir como mínimo la intervención de un creador o de una fuerza creadora. Es posible que la ciencia no llegue nunca a precisar el momento exacto de la creación, aproximándose sólo al punto donde comienzan la filosofía, la metafísica y la teología. Stephen Hawking ha intentado adentrarse en este inseguro terreno. «Existen enormes posibilidades de que un universo como el nuestro no haya surgido nunca de un Big Bang», me dijo. «Creo que siempre tienen que aparecer implicaciones religiosas cuando se empieza a discutir sobre el origen del Universo; siempre debe haber alguna sugerencia religiosa. Sin embargo, pienso que la mayoría de los científicos prefieren ignorar el aspecto religioso del asunto.»

Hace unos pocos años, Hawking y algunos de sus colegas, en un momento en que se hallaban más interesados por

el significado del Universo que por sus características materiales, desarrollaron un principio que para algunos científicos fue una herejía, aunque para otros supuso el hallazgo de la perspectiva correcta para entender el Cosmos.

El principio de Hawking se basaba en un clásico experimento ideal. Su primera premisa era que todas las características de nuestro mundo cotidiano, del mundo subatómico y del propio Cosmos se hallan determinadas por unas cuantas leyes físicas y constantes básicas. Estas leyes, que quizá no superan el número de quince, han sido descubiertas por la ciencia y se refieren a la masa de las partículas elementales y a las potencias relativas de las fuerzas básicas que actúan entre aquéllas.

Hawking, en colaboración con Brandon Carter y otros colegas, descubrió que en la naturaleza existe un equilibrio extremadamente delicado. Por ejemplo, si la interacción fuerte que actúa sobre los quarks, los neutrones y los protones del núcleo atómico fuera un poco más débil, el único elemento que podría ser estable sería el hidrógeno. Ningún otro elemento podría existir.

Si la interacción fuerte fuera sólo un poco más potente en relación con el electromagnetismo (la fuerza que regula el comportamiento de algunos leptones, como los electrones y los neutrinos), un núcleo atómico que sólo contuviera dos protones (un diprotón) se convertiría en una entidad estable del Universo. Eso significa que el hidrógeno no existiría, y que las estrellas y las galaxias se habrían desarrollado, en todo caso, de una forma muy distinta a la que conocemos.

Si la constante gravitatoria fuera más fuerte (sólo 10^{25} veces menos potente que la interacción nuclear fuerte en lugar de 10^{38} veces) nuestro Universo sería pequeño y de corta duración. Las estrellas tendrían una masa 10^{-12} veces más pequeña que la del Sol, y sólo podrían existir durante aproximadamente un año, lo que apenas daría tiempo a que

se desarrollasen fenómenos biológicos complejos, como es el del ser humano.

Si la gravedad fuera menos potente de lo que es, la materia no se habría condensado en estrellas y galaxias y el Universo estaría frío y vacío. El desarrollo de nuestra Galaxia y nuestro Sistema Solar se debe precisamente a que la gravedad es mucho más débil que las otras tres fuerzas. Como señala Hawking, el crecimiento del Universo (tan próximo al límite entre la contracción y la expansión eterna que el hombre no ha sido capaz de medirlo), se ha producido con la rapidez precisa para que se formaran las galaxias y las estrellas.

«Lo cierto», me decía Hawking, «es que un Universo como el nuestro, con galaxias y estrellas, es realmente algo extraordinario. Las posibilidades de existencia de un universo en el que se producen formas de vida como la nuestra son mínimas, si se consideran las leyes y constantes que podrían haberse desarrollado».

Está también la cuestión de la entropía. Este proceso que genera un incremento perpetuo de la desintegración y el caos se rige por la segunda ley de la termodinámica, en la que se afirma que cualquier transformación producida en el Universo dará lugar a una situación ligeramente más desordenada. La entropía siempre aumenta, mientras que el orden siempre decrece. La prueba de esta tendencia universal hacia la desintegración se encuentra en todas partes: los coches se oxidan, las estrellas se enfrían y mueren, los aparatos de música se estropean, la gente envejece, las montañas se erosionan y los edificios se derrumban. Este hecho plantea un dilema: Si el Universo es algo así como un reloj que se va parando, ¿cómo comenzó a andar, teniendo en cuenta esta tendencia natural? En contra de la segunda ley de la termodinámica, el orden ha surgido del caos.

La segunda ley de la termodinámica no es absoluta. La entropía puede decrecer, o lo que es lo mismo, el orden pue-

de aumentar de forma natural, aunque esto es algo extremadamente improbable. Imaginemos que agitamos las piezas de un reloj en un recipiente y al sacarlos aparece un aparato en funcionamiento. ¿Fue así como se produjo el Big Bang? ¿Es nuestro Universo una inversión enorme y accidental de la entropía? ¿O es literalmente un milagro?

Hawking piensa que la única forma de explicar nuestro Universo es mediante nuestra propia presencia en él. «Este principio podría expresarse con la frase: "Las cosas son como son porque existimos nosotros".»

«Según una de las versiones de este principio, existe una gran cantidad de universos diferentes y separados», me decía. «Cada uno de ellos presenta distintos valores en sus parámetros físicos y en sus condiciones iniciales. En la mayor parte de estos universos no se dan las condiciones adecuadas para el desarrollo de la vida inteligente.»

«Sin embargo, en un pequeño número de ellos podrían existir condiciones y parámetros similares a los de nuestro Universo», continuó. «En esos mundos sería posible el desarrollo de formas de vida inteligente capaces de plantearse la pregunta de "por qué el Universo es tal como lo observamos". La única respuesta sería que, si fuera de otra forma, no habría nadie que pudiera hacerse esa pregunta.»

«Sorprendentemente, este principio nos ayuda a explicar muchas de las interesantes relaciones numéricas que se observan entre los valores de diferentes parámetros físicos», señaló Hawking.

Brandon Carter ha bautizado a este curioso concepto con el nombre de "principio antrópico". Algunos científicos rechazan este principio antrópico de Carter y Hawking, argumentando que no ofrece ninguna explicación sobre nada; por su parte, la mayoría de los teólogos piensan que dicho principio es confuso e insatisfactorio, puesto que no remite con claridad a la obra de un creador.

Nadie ha podido demostrar aún el hecho de que un universo surgido de un acto de creación deba tener necesariamente las características que tiene el nuestro. Es posible que el principio antrópico (una especie de argumentación incompleta que no llega a satisfacer realmente nuestra curiosidad acerca del origen del Universo), sea lo mejor que puede hacer la ciencia por el momento.

Hawking, el hombre más curioso que hay en el mundo, reconoce que el principio antrópico no consigue proporcionar una auténtica descripción científica del Universo en sentido estricto. «Aunque confiemos en el principio antrópico, aún necesitamos una teoría unificada para explicar las condiciones iniciales del Universo», me decía.

Algunos físicos consideran esta concepción con gran seriedad. John Wheeler, profesor de la Universidad de Texas, conocido como uno de los físicos más importantes de la actualidad, ha estudiado la idea antrópica imaginando un conjunto de universos en interminables ciclos de expansión y contracción cósmica. El marco en el que tiene lugar esta realidad es lo que él llama el "superespacio", un espacio infinito-dimensional en el que cada punto puede corresponderse con la geometría total de un universo.

En el superespacio caben casi todas las variedades imaginables de universos, desde los que se contraen a los pocos minutos de nacer hasta los que están llenos de estrellas verdes o rojas. La mayor parte de estos universos del superespacio no han llegado a producir vida. Wheeler está de acuerdo con Hawking y Carter en que nuestro Universo reúne unas condiciones únicas para producir vida, aunque ésta se produzca sólo en un rincón pequeño y perdido del mismo.

Desde este punto de vista, la humanidad podría ser la joya real de toda la creación. El Universo es como es porque nosotros hemos aparecido en él. Wheeler llega a sugerir incluso que un universo en el que no se ha producido la vida

es un universo fallido. Además, está convencido de que un universo en el que no se pueda desarrollar la vida no podría haberse producido en primer lugar.

Este "principio del observador", como lo llama Wheeler, constituye una derivación de la idea cuántica de que la física subatómica no existe si no hay un observador capaz de entenderla. Según Wheeler vivimos en un Universo que participa y depende del observador. Todas las leyes físicas dependen de la presencia de un observador capaz de formularlas.

Por último, Wheeler sugiere que este principio conduce a la idea de que las mismas leyes de la física constituyen el lado contrario de la nada primordial, de la entropía total. Un universo sin un observador no es tal.

Recientemente, algunos físicos han encontrado una relación entre el trabajo de este físico y las concepciones más ocultas del misticismo oriental. Piensan que paradojas, misterios y probabilidades, así como la dependencia de la mecánica cuántica con respecto al observador, habían sido ya anticipadas por los libros hinduistas, budistas y taoístas. En realidad, la mecánica cuántica, tan apreciada por los llamados nuevos físicos, constituye sólo un redescubrimiento de Shiva o Mahadeva, la enastada diosa hindú de la destrucción y la disolución cósmica.

Shiva, mencionada ya en el siglo III o IV a. de J.C., puede asumir distintas formas. Una de ellas es la de Nataraja, el Señor de la Danza Cósmica, que tiene cuatro brazos y suele representarse bailando sobre un demonio abatido. La danza de la divinidad simboliza el perpetuo proceso de la creación y destrucción universal. La materia no tiene sustancia alguna; sólo es un ciclo rítmico y dinámico de energía que fluye de un lado a otro.

David Bohm, profesor de física teórica en el Birkbeck College, es uno de estos nuevos teóricos. En su opinión, la ciencia convencional niega o ignora la capacidad de la mente humana para captar las realidades superiores. El agotamiento de la ciencia oficial se debe a su afán por analizar la experiencia de forma compartimentada. La mente humana, y particularmente la del físico, tiene una irresistible necesidad de imponer categorías a la experiencia.

En consecuencia, el tejido de la realidad física se divide en hechos independientes que aparentemente se producen de forma simultánea o en distintas partes del tiempo y el espacio. Al comprender el misticismo oriental, los físicos pueden liberar sus mentes, aunque sólo sea por un momento, de esta prisión que ellos mismos se han creado, y llegar así a experimentar un instante de creación científica.

Brian Josephson, uno de los colegas de Hawking en Cambridge, practica activamente las técnicas de meditación orientales. Ganador del Premio Nobel en 1973, Josephson concentra su interés en las relaciones entre la inteligencia humana y el mundo observado por ella. Está convencido de que mediante la comprensión del misticismo oriental conseguirá entender mejor la realidad objetiva.

«Pienso que eso no es más que simple basura», dijo Hawking. Dejé de escribir en mi cuaderno de notas y le miré con cara de extrañado. «Siga escribiendo», ordenó, «es una completa basura.»

Aquella mañana de finales de la primavera nos encontrábamos ambos en su estudio. Habíamos estado hablando sobre las relaciones entre el Big Bang y Dios y el principio antrópico. Le había pedido su opinión sobre el entusiasmo de algunos físicos en la búsqueda del vínculo entre las transformaciones de la materia y la energía descritas por la física cuántica y los ciclos de creación y disolución del misticismo oriental. Niels Bohr, el iniciador del estudio de los cuantos, también había señalado la inutilidad de pretender elaborar especulaciones religiosas, místicas o parapsicológicas a partir de la mecánica cuántica.

«El Universo del misticismo oriental es una ilusión», dijo Hawking. «Cualquier físico que intente relacionarlo con su trabajo habrá abandonado inevitablemente la física.»

El 29 de abril de 1980, Hawking fue nombrado profesor Lucasiano de Matemáticas en Cambridge. Su acceso a este cargo, uno de los más importantes de la universidad, constituyó un notable triunfo por su parte. Su conferencia de presentación, titulada *¿Nos encontramos ante el fin de la física teórica?*, fue leída en su nombre por uno de sus alumnos.*

Según afirmaba Hawking, la humanidad contaría muy pronto con una nueva teoría capaz de explicar cómo era el Universo en sus primeros momentos y por qué éste se comporta en la actualidad de la forma en que lo hace. Para ello habrá que llegar a una comprensión más sólida de las cuatro fuerzas que se observan en la naturaleza. La clave de esta comprensión será una teoría cuántica de la gravedad, a la que podrá llegarse en los próximos veinte años. Hawking concluyó su disertación con una "observación ligeramente alarmista".

«En la actualidad», dijo, «las computadoras constituyen una útil ayuda para la investigación, pero es la mente humana la que las dirige. No obstante, si se considera el rápido desarrollo que están experimentando las computadoras en los últimos tiempos, parece muy probable que éstas puedan llegar a encargarse por sí mismas de todas las cuestiones relacionadas con la física teórica».

«Por eso, es posible que nos encontremos ante el fin de los físicos teóricos, si no de la Física Teórica.»

Dos años después nos encontrábamos conversando sobre su conferencia. Mi interés estaba centrado especialmente en

* El discurso completo se halla incluido en el apéndice del presente libro.

sus observaciones finales. «Lo cierto», me decía, «es que durante los últimos veinte (o cincuenta) años hemos avanzado tanto que no parece probable que podamos continuar a este ritmo indefinidamente.»

«Por eso, creo que sólo hay dos posibilidades: quedarnos estancados y dejar de progresar, o encontrar pronto la teoría unificada, lo que podría ocurrir en los próximos veinte años.»

A continuación le pregunté sobre su propio futuro en el campo de la física.

«Por lo que se refiere a la física teórica, he llegado ya a la cima de mis posibilidades», contestó Hawking. «Verdaderamente, no podré llegar más lejos.» Había cumplido cuarenta años en enero de 1982. Con el habitual pragmatismo que le ha caracterizado en su lucha contra las adversidades durante las dos últimas décadas, continuó explicando:

«Bien, usted sabe que la mayor parte de los trabajos importantes en el campo de la física teórica se realizan a edades muy tempranas, generalmente entre los veinte y los treinta años. Por eso, a la edad de cuarenta años no se puede esperar hacer grandes descubrimientos en física teórica.»

La causa de esto, señaló, es que las personas comienzan a perder su agilidad mental al envejecer. «Además, la gente joven está libre de prejuicios», añadió. «Cuando conciben alguna nueva idea radical, no dudan en desarrollarla y publicarla.»

Cabe preguntarse dónde reside la firmeza de carácter de Hawking. ¿En su terquedad, en su reticencia a tomar un solo día de descanso aunque se encuentre aquejado de gripe o catarro? ¿O en alguna otra especie de tenacidad mental, de inmutabilidad que le aparta de toda queja, e incluso de todo pensamiento relacionado con su estado físico, un estado que habría destruido a cualquier otro hombre más débil que él?

Probablemente su resistencia reside un poco en ambas cualidades. Stephen Hawking es un hombre muy tenaz, el hombre más tenaz que he conocido. Pero es mucho más que eso; es la criatura más cerebral de nuestro planeta, un hombre que vive para pensar.

«Creo que llegaremos a elaborar la teoría unificada en las dos próximas décadas, seguramente en una serie de pequeños pasos», me dijo. «Pero cuando la encontremos se acabará, como usted sabe, el objeto de la física teórica.»

Apéndice

¿Nos encontramos ante el fin de la Física Teórica? Conferencia de Stephen Hawking

En la presente conferencia quisiera disertar sobre la posibilidad de que pueda alcanzarse el objetivo de la física teórica en un futuro no demasiado lejano, como serían las postrimerías del siglo. Lo que quiero decir con esto es que entonces podremos tener una teoría completa, consistente y unificada sobre las interacciones físicas que podría describir todas las observaciones posibles. Desde luego, hay que ser muy prudente al hacer predicciones de este tipo. Al menos en dos ocasiones pasadas hemos llegado a pensar que estábamos a punto de alcanzar la síntesis final. A comienzos del presente siglo se creía que todo podía entenderse en términos de mecánica continua. Lo único que había que hacer era medir un número determinado de coeficientes de elasticidad, viscosidad, conductividad, etc. Estas expectativas quedaron rotas por el descubrimiento de la estructura atómica y la mecánica cuántica. Del mismo modo, a finales de la década de 1920, Max Born declaró ante un grupo de científicos de visita en Göttingen que, «la física, tal como la conocemos, dejará de existir en seis meses.» Esta afirmación se produjo poco después del descubrimiento de la ecuación Dirac, que rige el comportamiento del electrón, por parte de Paul Dirac, antiguo ocupante de la Silla Lucasiana. Se esperaba que una

ecuación como ésta podría servir para controlar al protón, la otra partícula supuestamente elemental que se conocía en aquella época. Sin embargo, el descubrimiento del neutrón y de las fuerzas nucleares defraudó estas esperanzas. Hoy sabemos que el protón y el neutrón no son auténticas partículas elementales, sino que están compuestos por otras partículas más pequeñas.

De todas formas, hemos hecho grandes progresos en los últimos años y, como voy a demostrar a continuación, se puede albergar un prudente optimismo en la esperanza de que algunos de los aquí presentes lleguemos a ver pronto una teoría completa.

Incluso si alcanzáramos un teoría unificada completa, no podríamos hacer predicciones detalladas nada más que en las situaciones más sencillas. Por ejemplo, hoy conocemos ya las leyes físicas que rigen todo lo que experimentamos en la vida contidiana: como señaló Dirac, su ecuación constituía la base de «la mayor parte de la física y de toda la química.» Sin embargo, sólo hemos podido resolver la ecuación en el sistema más sencillo, el átomo de hidrógeno compuesto por un protón y un electrón. En el caso de átomos con mayor número de electrones, por no hablar de las moléculas con más de un núcleo, tenemos que recurrir a aproximaciones y conjeturas intuitivas de dudosa validez. En los sistemas macroscópicos compuestos por 10^{23} partículas, por ejemplo, tenemos que utilizar métodos estadísticos y renunciar a cualquier pretensión de resolver las ecuaciones con exactitud. Aunque en principio conocemos las ecuaciones por las que se rigen todos los mecanismos biológicos, lo cierto es que no podemos reducir el estudio del comportamiento humano a una rama de las matemáticas aplicadas.

¿Qué es lo que entendemos por una teoría completa y unificada de la física? Los intentos que hemos llevado a cabo para construir la realidad física suelen constar de dos partes:

1. El establecimiento de leyes locales por las que se rijan las diversas cantidades físicas. Éstas suelen formularse por medio de ecuaciones diferenciales.
2. El establecimiento de las condiciones que nos indican los límites y el estado de algunas regiones del Universo en un período determinado, así como los efectos que consecuentemente se propagan en el interior de estas regiones desde el resto del Universo.

Muchas personas podrían argüir que el papel de la ciencia se limita a la primera de estas tareas, y que la física teórica alcanzará su objetivo cuando consiga una exposición completa de las leyes físicas locales. Podría argumentarse que la cuestión de las condiciones iniciales del Universo corresponde más bien al campo de la metafísica o de la religión. Esta actitud es similar en algún sentido a la de aquellos que se oponían a la investigación científica en los siglos pretéritos con el pretexto de que todos los fenómenos naturales eran obra de Dios y, por tanto, no debía indagarse en ellos. En mi opinión, el tema de las condiciones iniciales del Universo es tan apropiado para los estudios científicos como lo es el de las leyes físicas locales. Mientras nos limitemos a decir que «las cosas son como son porque siempre han sido así», no podremos tener una teoría completa.

La cuestión de la unicidad de las condiciones iniciales del Universo se encuentra estrechamente relacionada con la arbitrariedad de las leyes físicas locales: una teoría no puede considerarse completa si contiene un número de parámetros ajustables tales como masas o acoplamientos constantes a los que puede darse el valor que se quiera. En realidad, parece como si las condiciones iniciales y los valores de los parámetros de la teoría no fueran arbitrarios, sino que hubieran sido elegidos o identificados de forma muy cuidadosa. Por ejemplo, si la diferencia entre las masas de un protón y un neutrón

no fuera aproximadamente el doble de la masa de un electrón, no podrían obtenerse los dos centenares de nucleidos estables que componen los elementos y constituyen la base de la química y la biología. De igual modo, si la masa gravitatoria del protón fuera significativamente diferente a como es, no existirían estrellas en las que se pudieran desarrollar esos nucleidos; si la expansión inicial del Universo hubiera sido un poco más pequeña o más grande, dicho Universo se habría contraído antes de producirse el desarrollo de las estrellas, o se habría expandido con tanta rapidez que las estrellas nunca se habrían podido formar por condensación gravitatoria. Algunas personas se han atrevido a elevar estas limitaciones en las condiciones iniciales y los parámetros a la categoría de principio; es el principio antrópico, que podría resumirse en el axioma de que "las cosas son como son porque existimos nosotros". Una versión de este principio sugiere que existe un gran número de universos distintos e independientes en los que el valor de los parámetros físicos y las condiciones iniciales son diferentes. La mayor parte de estos universos no contienen las condiciones adecuadas para el desarrollo de las complicadas estructuras necesarias para la vida inteligente. Sólo en un pequeño número de ellos, dotados de unas condiciones y parámetros similares a los de nuestro Universo, sería posible el desarrollo de vida inteligente capaz de plantearse la pregunta de "¿por qué es el Universo tal como lo observamos?". Por supuesto, la respuesta es que, si fuera de otra forma, no habría nadie que pudiera hacerse esa pregunta.

El principio antrópico proporciona una cierta explicación sobre muchas de las interesantes relaciones numéricas que se observan entre los valores de diferentes parámetros físicos. Sin embargo, este principio no es plenamente satisfactorio, pues seguimos intuyendo que debe haber alguna explicación más profunda. Además, con él no se puede alcanzar una

comprensión de todas las regiones del Universo; por ejemplo, nuestro Sistema Solar constituye verdaderamente un requisito esencial para nuestra existencia, como lo es el hecho de la formación temprana de estrellas próximas en las que pudieran formarse elementos pesados por síntesis nuclear. Es posible que eso fuera todo lo que se necesitaba en el conjunto de nuestra Galaxia. Sin embargo, no parece que hubiera ninguna necesidad de que existieran otras galaxias, teniendo en cuenta el millón de millones de ellas que podemos ver en una distribución más o menos uniforme a lo largo del Universo observable. Esta homogeneidad a gran escala del Universo hace muy difícil el mantenimiento de una visión antropocéntrica o de la creencia en que la estructura cósmica esté determinada por algo tan marginal como son algunas estructuras moleculares desarrolladas en un planeta menor que gira alrededor de una estrella mediana en los suburbios exteriores de una galaxia espiral muy típica.

Si vamos a prescindir del principio antrópico, necesitaremos una teoría unificadora que pueda explicar las condiciones iniciales del Universo y los valores de los diversos parámetros físicos. Sin embargo, resulta difícil concebir una teoría completa de todo lo que existe en un solo golpe de intuición (aunque esto no parece desanimar a algunas personas, como lo demuestra el hecho de que cada semana recibo dos o tres teorías unificadas por el correo). Por el contrario, lo que nosotros hacemos es buscar teorías parciales que permitan describir situaciones en las que se puedan eludir o intuir ciertas interacciones de una forma sencilla. En primer lugar, dividimos en dos partes el contenido material del Universo: las partículas "materiales", tales como los quarks, electrones, muones, etc., y las "interacciones", como la gravedad, el electromagnetismo, etc. Las partículas materiales se definen como campos de una revolución media-entera y se rigen por el principio de exclusión de Pauli, que impide que más de una

partícula de un tipo determinado permanezca en un estado cualquiera. Ésta es la razón por la que existen cuerpos sólidos que no se contraen ni se difunden por el infinito. Los principios de la materia se dividen en dos grupos: los hadrones, compuestos por quarks, y los leptones, que comprenden el resto.

Desde el punto de vista fenomenológico, las interacciones se dividen en cuatro categorías. Por orden de fuerza estas categorías son: la interacción nuclear fuerte, que sólo actúa con los hadrones; el electromagnetismo, que actúa con hadrones cargados y leptones; la interacción nuclear débil, que actúa con todos los hadrones y leptones; y, por último, la gravedad, mucho más débil que las otras, y que actúa con todas las partículas. Las interacciones se representan como campos de revoluciones enteras que no obedecen el principio de exclusión de Pauli, lo que significa que pueden tener muchas partículas en el mismo estado. En el caso del electrón y la gravedad, las interacciones tienen también un amplio radio de acción, es decir, que los campos producidos por un gran número de partículas materiales pueden sumarse para crear un campo capaz de ser detectado a escala macroscópica. Estas características son las que han permitido el hecho de que las primeras teorías que se han desarrollado se refieran a estas interacciones, la de la gravedad de Newton en el siglo XVII, y la del electromagnetismo de Maxwell en el XIX. Sin embargo, estas dos teorías eran básicamente incompatibles, pues la de Newton era invariable siempre que se le diera una velocidad uniforme a la totalidad del sistema, mientras que la de Maxwell definía una velocidad preferente, la de la luz. Al final se hizo evidente que la teoría newtoniana de la gravedad era la que debía modificarse para hacerse compatible con las propiedades invariables de la teoría de Maxwell. Esta conciliación fue conseguida gracias a la teoría general de la relatividad de Einstein, que se formuló en 1915.

La teoría de la relatividad general de la gravedad y la teoría de la electrodinámica de Maxwell fueron conocidas como teorías clásicas, que implicaban cantidades continuamente variables y que, al menos en principio, podían medirse con una precisión arbitraria. Sin embargo, el problema surgió cuando se intentó utilizar estas teorías para construir un modelo del átomo. Se había descubierto que el átomo estaba compuesto por un pequeño núcleo cargado positivamente, el cual se hallaba envuelto por una nube de electrones con carga negativa. La suposición natural que se derivaba de esto era que los electrones giraban en torno al núcleo del mismo modo en que la Tierra gira en órbita alrededor del Sol. Sin embargo, la teoría clásica preveía la posibilidad de que los electrones irradiaran ondas electromagnéticas. Estas ondas se llevarían una cantidad de energía, lo que originaría el movimiento en espiral de los electrones hacia el núcleo y la consiguiente contracción del átomo.

Este problema fue superado gracias al descubrimiento de la teoría cuántica, que ha constituido sin duda el éxito más importante de la física teórica durante el presente siglo. El postulado básico de esta teoría es el principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual, ciertos pares de cantidades, tales como la posición y el momento de una partícula, no puedan medirse simultáneamente con precisión arbitraria. En el caso del átomo, esto significa que, en su estado más bajo de energía, el electrón no podría quedar en reposo ante el núcleo, debido a que, en tal caso, su posición y su velocidad se definirían con exactitud. Por el contrario, el electrón tendría que esparcirse en una distribución probable alrededor del núcleo. En tal estado, el electrón no irradiaría energía en forma de ondas electromagnéticas, pues no quedaría lugar para un nivel inferior de energía al que pudiera pasar.

En las décadas de 1920 y 1930 la mecánica cuántica se aplicó con gran éxito a los sistemas nucleares y moleculares,

que sólo tienen un número finito de grados de libertad. No obstante, las dificultades surgieron cuando se intentó aplicar al campo electromagnético, cuyo número de grados de libertad es infinito, siendo aproximadamente de unos dos por cada punto del espacio-tiempo. Se puede considerar a estos grados de libertad como osciladores, cada uno de los cuales tiene su propia posición y su momento. Los osciladores no pueden permanecer en reposo, pues en ese caso tendrían posiciones y momentos definidos con exactitud. Por el contrario, cada oscilador debe tener una cantidad mínima de lo que se conoce como "fluctuaciones punto-cero", y una energía no nula. Las energías de las fluctuaciones punto-cero de todos los infinitos grados de libertad convertirían en infinitas a la masa y a la carga aparentes del electrón.

Con el fin de superar esta dificultad, a finales de la década de 1940 se desarrolló un procedimiento llamado de renormalización. Consistía en la sustracción, más bien arbitraria, de ciertas cantidades infinitas con el objeto de que las magnitudes restantes fueran finitas. En el caso de la electrodinámica era necesario hacer dos sustracciones infinitas, una en la masa y otra en la carga del electrón. Este procedimiento de renormalización no ha representado nunca una base conceptual o matemática demasiado sólida, pero en la práctica ha funcionado muy bien. Su mayor éxito fue la predicción del movimiento Lamb, en algunas líneas del espectro del hidrógeno atómico. Sin embargo, dicho procedimiento no resulta muy satisfactorio de cara a construir una teoría completa, pues no proporciona ninguna predicción de los valores de las magnitudes restantes que quedan después de hacer infinitas sustracciones. Por tanto, tendremos que volver al principio antrópico para explicar la masa y la carga del electrón.

Durante las décadas de 1950 y 1960 se generalizó la convicción de que las interacciones nucleares débiles y fuertes no

podían ser renormalizadas, pues necesitarían una cantidad infinita de sustracciones infinitas para convertirse en finitas. Habría un número infinito de magnitudes restantes que no serían determinadas por la teoría. Un procedimiento como éste no tendría capacidad predictiva debido a que nunca se podrían medir todas las cantidades infinitas de parámetros. Sin embargo, t'Hooft demostró en 1971 que el modelo unificado de las interacciones electromagnéticas y débiles que habían propuesto anteriormente Salam y Weinberg podía renormalizarse de hecho con sólo un número finito de sustracciones infinitas. Según la teoría de Salam y Weinberg, el fotón, la partícula spin-1 que sirve de vehículo a la interacción electromagnética, está unida a otras tres spin-1 asociadas, cuyos nombres son W^+, W^- y Z^0. La teoría prevé que, a niveles muy altos de energía, estas cuatro partículas se comportarían de modo similar. No obstante, para el caso de un nivel inferior de energía, se recurre a un fenómeno llamado "ruptura espontánea de simetría", a fin de explicar el hecho de que el protón tenga una masa de reposo cero mientras que las partículas W^+, W^- y Z^0 tienen todas ellas una gran masa. Las predicciones sobre baja energía de esta teoría fueron confirmadas de forma notable por las observaciones experimentales, lo que contribuyó a que la Academia Sueca se decidiera a conceder el Premio Nobel del año pasado a Salam y Weinberg, y también a Glashow, que había elaborado unas teorías unificadas similares. Sin embargo, el propio Glashow señaló que el Comité Nobel se había arriesgado bastante al concederles el premio, pues aún no se dispone de aceleradores de partículas con la suficiente potencia energética como para comprobar la teoría en las condiciones reales en que se produjo la unificación entre las fuerzas electromagnéticas, transportadas por los fotones, y las interacciones débiles, transportadas por las partículas W^+, W^- y Z^0. Dentro de pocos años contaremos con aceleradores suficientemente potentes, gra-

cias a los cuales, según cree la mayoría de los físicos, se podrá confirmar la teoría de Salam y Weinberg.

El éxito de la teoría de Salam y Weinberg condujo a la búsqueda de una teoría similar de renormalización para las interacciones fuertes. Muy pronto se comprendió que el protón y otros hadrones, tales como el mesón pi, no podían ser auténticas partículas elementales, sino que tenían que constituir un estado límite de otras partículas llamadas quarks. Aunque pueden moverse con gran libertad en el interior de un hadrón, los quarks tienen la curiosa propiedad de que, aparentemente, no pueden separarse en unidades independientes; siempre se presentan en grupos de tres (como protones o neutrones), o en parejas compuestas por un quark y un antiquark (como los mesones pi). Para explicar este hecho se ha atribuido a los quarks una cualidad denominada color. Es necesario señalar que tal cualidad no tiene ninguna relación con nuestra percepción normal del color, puesto que los quarks son demasiado pequeños como para que podamos observarlos con la luz visible. Se trata sólo de una denominación convencional, por medio de la cual se intenta indicar la idea de que los quarks pueden adoptar tres colores (el rojo, el verde y el azul), mientras que cualquier estado límite aislado, como por ejemplo un hadrón, debe ser incoloro, tanto si la combinación cromática es de rojo, verde y azul, como en el caso del protón, o si es una mezcla de rojo y antirrojo, verde y antiverde y azul y antiazul, como en el mesón pi.

Se supone que las interacciones fuertes que se producen entre los quarks son transmitidas por unas partículas spin-1, llamadas gluones, las cuales son muy parecidas a las que transmiten la interacción débil. Los gluones también transportan color, y tanto ellos como los quarks obedecen a una teoría de renormalización denominada cromodinámica cuántica, cuyas siglas son QCD *(quantum chromodynamics)*. Una de las consecuencias más importantes del procedimiento de renormalización es que el ajuste efectivo y constante de la teoría depende de la energía con la que se mida, y que dicho ajuste disminuye hasta cero en los niveles muy elevados de energía. Este fenómeno se conoce como libertad asintótica, lo que significa que los quarks se comportan en el interior del hadrón de una forma muy similar a como lo harían si fueran partículas libres en colisiones de alta energía, y por tanto, es posible aplicarles con éxito la teoría de la perturbación. Las predicciones de la teoría de la perturbación guardan una razonable relación cualitativa con las observaciones, aunque aún no se puede afirmar que dicha teoría se haya verificado experimentalmente. En niveles bajos de energía, el ajuste efectivo y constante se hace muy grande, y la teoría de la perturbación se desmorona. Se espera que esta "esclavitud infrarroja" podrá explicar el motivo por el que los quarks están obligados a adoptar siempre estados límites incoloros, aunque hasta ahora nadie ha podido demostrar esto de una forma realmente convincente.

Tras haber obtenido una teoría de renormalización para las interacciones fuertes y otra para las débiles y las electromagnéticas, se hizo evidente la necesidad de buscar una teoría capaz de combinar a ambas. Estas teorías recibieron el nombre, bastante exagerado, por cierto, de "grandes teorías unificadas", o GUTs. Este nombre era algo engañoso, pues las teorías no eran tan grandes, ni estaban totalmente unificadas, ni constituían teorías completas en las que hubiera un número de parámetros indeterminados de renormalización, tales como constantes de ajuste y masas. No obstante, dichas teorías pueden constituir un importante paso hacia la elaboración de una teoría unificada completa. Su idea básica es que la constante de ajuste efectivo de las interacciones fuertes, que es grande a niveles bajos de energía, disminuye gradualmente a niveles elevados de energía debido a la libertad asintótica. Por su parte, la constante de ajuste efectivo de la teoría de Sa-

lam y Weinberg, que es pequeña a niveles bajos de energía, aumenta gradualmente a niveles elevados de energía, debido a que esta teoría no tiene libertad asintótica. Si se extrapola la proporción de aumento y disminución a baja energía de las constantes de ajuste, se comprueba que las dos constantes de ajuste se igualan a una energía de 10^{15} GeV, aproximadamente. Las teorías presuponen que por encima de esta energía las interacciones fuertes se unifican con las débiles y electromagnéticas, pero que a niveles más bajos de energía se produce una ruptura de simetría espontánea.

Ningún laboratorio experimental puede producir una energía de 10^{15} GeV; los aceleradores de partículas de la actual generación pueden producir energías de centro de masa de unos 10 GeV, y los de la próxima generación llegarán a producir unos 100 GeV. Este nivel será suficiente para investigar el punto energético en el que las fuerzas electromagnéticas se unifican con las interacciones débiles, según la teoría de Salam y Weinberg, aunque no servirá para observar los enormes niveles de energía con los que se supone que llegarían a unificarse las interacciones débiles y electromagnéticas y las interacciones fuertes. No obstante, las grandes teorías unificadas pueden proporcionar predicciones sobre experimentos a baja energía comprobables en el laboratorio. Las teorías prevén, por ejemplo, que el protón no es totalmente estable, pues debería descomponerse en un período del orden de los 10^{31} años. El límite experimental más bajo que se tiene en la actualidad sobre este período es de unos 10^{30} años, pero esto podría mejorarse.

Otra predicción observable es la que se refiere a la relación entre bariones y fotones en el Universo. Las leyes de la física parecen verificarse igualmente para las partículas y para las antipartículas. De forma más precisa, se puede decir que dichas leyes se verifican igual cuando las partículas son reemplazadas por antipartículas, cuando las que van hacia la derecha son reemplazadas por otras que van hacia la izquierda, y cuando se invierten las velocidades de todas las partículas. Esto se conoce con el nombre de teorema CPT, el cual se deriva de las suposiciones básicas que se mantendrían en cualquier teoría razonable. Sin embargo, la Tierra, e incluso todo el Sistema Solar, están constituidos por protones y neutrones sin antiprotones ni antineutrones. De hecho, este desequilibrio entre partículas y antipartículas constituye incluso una condición previa más para nuestra existencia, pues si el Sistema Solar se compusiera de una mezcla equilibrada de partículas y antipartículas, éstas se aniquilarían entre sí y sólo producirían radiaciones. Teniendo en cuenta que las observaciones prueban la ausencia de estas radiaciones de aniquilación en nuestra Galaxia, podremos concluir que ésta se halla totalmente compuesta de partículas, y no de antipartículas. No contamos con ninguna evidencia directa de otras galaxias, pero parece probable que estén compuestas por partículas; el exceso de las partículas sobre las antipartículas en el conjunto del Universo parece ser aproximadamente de 1 partícula por cada 10^{8} fotones. Se podría intentar aplicar a esto el principio antrópico, pero las grandes teorías unificadas proporcionan realmente un posible mecanismo para explicar el desequilibrio. Aunque todas las interacciones parecen invariables en la combinación de C (sustitución de partículas por antipartículas), P (cambio en la dirección de derecha a izquierda) y T (inversión en la dirección del tiempo), se conoce la existencia de interacciones que no son invariables en T, exclusivamente. En el Universo inicial, en el que la expansión marca la dirección del tiempo de una forma muy precisa, estas interacciones podrían producir más partículas que antipartículas. Sin embargo, la cantidad resultante depende mucho del modelo, por lo que su contrastación con la observación no puede constituir una plena confirmación de las grandes teorías unificadas.

Hasta el momento, la mayor parte de los esfuerzos realizados se han dedicado a la unificación de las tres primeras categorías de interacciones físicas, las interacciones nucleares fuertes y débiles y el electromagnetismo. La cuarta y última, la gravedad, ha sido ignorada. Una de las justificaciones de esta omisión es que la gravedad es tan débil que los efectos gravitatorios cuánticos sólo se manifestarían con amplitud al nivel de la energía de las partículas, pero no al de la energía de los aceleradores de partículas. Otra justificación es que la gravedad no parece ser renormalizable; si se quieren obtener respuestas finitas quizá habría que efectuar un número infinito de sustracciones infinitas con el correspondiente número infinito de magnitudes sobrantes indeterminadas y finitas. Pero si se quiere obtener una teoría totalmente unificada habrá que incluir la gravedad. Además, la teoría clásica de la relatividad general prevé la posible existencia de singularidades espacio-temporales cuyo campo gravitatorio se haría infinitamente fuerte. Estas singularidades pudieron darse en el pasado, en los comienzos de la actual expansión del Universo (el Big Bang), y podrían producirse en el futuro, en la contracción gravitatoria de las estrellas y, posiblemente, en la contracción del propio Universo. Es muy probable que la predicción de singularidades suponga el futuro desmoronamiento de la teoría clásica; sin embargo, no parece que haya ninguna razón por la que dicho desmoronamiento tenga que producirse antes de que el campo gravitatorio se haya hecho suficientemente fuerte como para que los efectos gravitatorios cuánticos sean importantes. Por consiguiente, es esencial elaborar una teoría cuántica de la gravedad, si queremos describir el universo inicial y explicar las condiciones iniciales sin tener que recurrir al principio antrópico.

También necesitamos esta teoría para responder a la siguiente pregunta: el comienzo, y el posible final, del tiempo, ¿existen realmente, como predijo la relatividad general clásica,

o acaso se dispersaron de alguna forma las singularidades en el Big Bang y en el Big Crunch (gran contracción) como consecuencia de los efectos cuánticos? Resulta difícil dar un significado bien definido a esta complicada pregunta, teniendo en cuenta que la propia estructura del espacio y el tiempo se halla sujeta al principio de incertidumbre. Personalmente, pienso que las singularidades siguen aún presentes, aunque se puede continuar sobrepasándolas en el tiempo en un cierto sentido matemático. No obstante, habría que abandonar cualquier concepción subjetiva del tiempo que se refiera al conocimiento o a la habilidad para medirlo.

¿Qué perspectivas existen para obtener una teoría cuántica de la gravedad y de la unificación de ésta con las otras tres categorías de interacciones? Las expectativas más halagüeñas se encuentran en una derivación de la relatividad general llamada supergravedad, en la que el gravitón, la partícula spin-2 portadora de la interacción gravitatoria, se relaciona con algunos otros campos de inferior revolución mediante las denominadas transformaciones supersimétricas. Lo más meritorio de esta teoría es que elimina la antigua dicotomía entre la "materia", representada por partículas de una revolución media-entera, y las "interacciones", representadas por partículas de revolución entera. Otra gran ventaja es que muchos de los infinitos que aparecen en la teoría cuántica se anulan mutuamente. Aún no se sabe si esta anulación mutua da como resultado una teoría finita sin ninguna sustracción infinita. Es de esperar que sea así, pues se puede comprobar que las teorías que incluyen la gravedad son finitas o imposibles de renormalizar; ello significa que, al efectuar varias sustracciones infinitas, será necesario hacer una serie infinita de ellas con la correspondiente serie infinita de magnitudes sobrantes indeterminadas. Por consiguiente, si resulta que todos los infinitos en supergravedad se anulan mutuamente, podríamos tener una teoría en la que se unificarían todas las partículas

materiales e interacciones, y que además no tendría ningún parámetro indeterminado de renormalización.

Aunque aún no contamos con una adecuada teoría cuántica de la gravedad, ni tampoco con una en la que se unifique ésta con las otras interacciones físicas, tenemos una cierta idea de algunas de las características que habría de tener. Una de ellas se relaciona con el hecho de que la gravedad incide en la estructura causal del espacio-tiempo; es decir, que la gravedad determina los acontecimientos que pueden relacionarse entre sí de forma causal. Un ejemplo de esto, según la teoría clásica de la relatividad general, es el de un agujero negro, que constituye una región del espacio-tiempo cuyo potente campo gravitatorio hace que la luz o cualquier otra señal sean absorbidos hacia su interior sin posibilidad de escape al mundo externo. El intenso campo gravitatorio próximo al agujero negro origina la formación de pares de partículas y antipartículas, una de las cuales cae en el agujero, mientras que la otra escapa hacia el infinito. La partícula que escapa parece haber sido emitida por el agujero negro. Un observador alejado del agujero negro sólo puede medir las partículas que salen, pero no puede relacionar a éstas con las que caen en el agujero, pues no las puede observar. Esto significa que las partículas escapadas tienen un grado de azarosidad o imprevisibilidad superior al que suele asociarse al principio de incertidumbre. En situaciones normales, el principio de incertidumbre implica la posibilidad de prever de forma precisa la posición de una partícula, *o* su velocidad, *o* una combinación de posición y velocidad. Esto significaría que nuestra capacidad de hacer previsiones precisas está más o menos cercenada. Sin embargo, en el caso de las partículas emitidas desde un agujero negro, el hecho de que no pueda observarse lo que sucede en el interior del agujero negro significa que no se puede prever con precisión *ni* las posiciones *ni* las velocidades de las partículas emitidas. Lo único que se puede hacer

es apuntar probabilidades de que las partículas se emitan de determinadas formas.

Todo parece indicar, por tanto, que aunque consiguiéramos encontrar una teoría unificada, sólo podríamos hacer predicciones estadísticas. Asimismo, tendríamos que abandonar la idea de que sólo podemos observar un universo único. Por el contrario, tendríamos que formarnos una imagen de todos los universos posibles con alguna distribución de probabilidades. Ello podría explicar el hecho de que el Universo comenzara en el Big Bang en un equilibrio térmico casi perfecto, puesto que el equilibrio térmico correspondería a la serie más grande de configuraciones microscópicas, y por tanto a la mayor probabilidad. Como habría dicho Pangloss, el filósofo creado por Voltaire, «vivimos en el más probable de todos los mundos posibles».

¿Qué perspectivas tenemos de encontrar una teoría unificada completa en un futuro no demasiado lejano? Al extender nuestras observaciones a escalas más pequeñas y a energías más altas, hemos ido descubriendo nuevos niveles estructurales. Así, a comienzos del presente siglo, el descubrimiento del movimiento browniano con su característica partícula energética de 3×10^{-2} eV, demostró que la materia no era continua, sino que estaba constituida por átomos. Poco después se descubrió que esos átomos, supuestamente indivisibles, estaban compuestos por electrones que giraban alrededor de un núcleo y cuya energía era de unos cuantos electronvoltios. El núcleo, a su vez, resultó estar constituido por las llamadas partículas elementales, los protones y los neutrones, que se mantienen unidos por fuerzas nucleares de unos 10^6 eV. El último episodio de esta historia ha sido el descubrimiento de que el protón y el neutrón están compuestos por quarks, que se mantienen unidos por fuerzas de unos 10^9 eV. Una de las consecuencias de los avances de la física teórica es que a partir de ahora se necesitan enormes máqui-

nas y grandes cantidades de dinero para llevar a cabo un experimento cuyos resultados no pueden preverse.

De nuestra experiencia pasada se podría concluir que existe una serie infinita de niveles estructurales a energías cada vez más elevadas. Esta idea de una sucesión regresiva e infinita de cajas metidas en cajas fue de hecho un dogma oficial en China durante la época de la Banda de los Cuatro. Sin embargo, parece ser que la gravedad podría marcar un límite, aunque sólo en el caso de que la escala dimensional sea tan pequeña como 10^{-33} cm o cuando el nivel de energía alcanza la elevada cifra de 10^{28} eV. En escalas dimensionales más pequeñas cabría esperar que el espacio-tiempo dejara de comportarse como un continuo uniforme y que podría adquirir una estructura espumosa como consecuencia de las fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio.

Existe una vasta región inexplorada entre nuestro límite experimental actual de unos 10^{10} eV y el cese gravitatorio de los 10^{28} eV. Parecería ingenuo suponer, como lo hacen las grandes teorías unificadas, que sólo hay uno o dos niveles estructurales en este enorme intervalo. No obstante, aún queda sitio para el optimismo: por el momento se cree que la gravedad puede unificarse con las otras interacciones físicas únicamente en algunas teorías de la supergravedad. Al parecer sólo hay un número finito de tales teorías. La más amplia de ellas es la denominada supergravedad extendida $N=8$, la cual contiene un gravitón, ocho partículas spin-3/2 llamadas gravitinos, veintiocho partículas spin-1, cincuenta y seis partículas spin-1/2 y setenta partículas spin-0. Aunque estas cantidades parecen elevadas, no lo son tanto como para explicar todas las partículas que creemos observar en las interacciones fuertes y débiles. La teoría $N=8$, por ejemplo, tiene veintiocho partículas spin-1, suficientes para explicar los gluones que transmiten las interacciones fuertes y dos de las cuatro partículas que transmiten las interacciones débiles, aunque no las

otras dos. En consecuencia, podría pensarse que muchas o casi todas las partículas observadas, como los gluones o los quarks, no son realmente elementales, como hemos creído hasta ahora, sino que constituyen estados límite de las partículas fundamentales $N=8$. No es probable que lleguemos a tener aceleradores suficientemente potentes como para comprobar estas estructuras compuestas en un futuro cercano, y tal vez no los tendremos nunca, si tomamos en cuenta las actuales perspectivas económicas. No obstante, el hecho de que estos estados límite hayan surgido de una teoría bien definida como la $N=8$, nos permitiría hacer algunas predicciones que podrían comprobarse en niveles de energía accesibles en la actualidad o en un futuro próximo. Esta situación sería, por tanto, similar a la de la teoría de la unificación del electromagnetismo y las interacciones débiles de Salam y Weinberg. Las predicciones de esta teoría en niveles bajos de energía se corresponden de tal manera con las observaciones, que en la actualidad su validez está plenamente aceptada, pese a que aún no se ha alcanzado el nivel de energía en el que se realizó la unificación.

Parece haber algo muy peculiar en la teoría que describe el Universo. ¿Por qué ha prosperado esta teoría mientras que otras se han quedado en la mente de sus creadores? La teoría de la supergravedad $N=8$ reúne algunas cualidades que le confieren un carácter muy especial. Según parece, podría ser la única teoría que:

1. Tiene cuatro dimensiones.
2. Incorpora la gravedad.
3. Es finita sin ninguna sustracción infinita.

Como he señalado ya, la tercera propiedad es indispensable si se quiere tener una teoría completa y sin parámetros. Sin embargo, resulta difícil explicar las propiedades 1 y 2 sin

recurrir al principio antrópico. Al parecer, existe una teoría consistente que puede aplicarse a las propiedades 1 y 3 pero que no incluye la gravedad. No obstante, es posible que en un Universo de ese tipo las fuerzas de atracción no tuvieran la fuerza suficiente como para formar los grandes conjuntos de materia que probablemente se necesitan para el desarrollo de estructuras complicadas. La razón por la que el espacio-tiempo tendría que tener cuatro dimensiones es una cuestión que suele considerarse ajena a la labor de los físicos. Sin embargo, también hay una argumentación satisfactoria derivada del principio antrópico. Tres dimensiones espacio-temporales, es decir, dos espaciales y una temporal, resultan claramente insuficientes para cualquier organismo complicado. Por otra parte, si hubiera más de tres dimensiones espaciales, las órbitas de los planetas alrededor del Sol, o los de los electrones en torno al núcleo, serían inestables y tenderían a cerrarse en espiral. Queda la posibilidad de que haya más de una dimensión temporal, pero resulta muy difícil imaginar un Universo de tales características.

Hasta aquí he sostenido implícitamente la existencia de una teoría definitiva. Pero, ¿existe realmente? Contamos con tres posibilidades, por lo menos:

1. Existe una teoría unificada completa.
2. No existe una teoría definitiva, pero hay una serie infinita de teorías en las que puede predecirse cualquier clase de observación particular, siempre que se aplique una que esté suficientemente apartada de la cadena.
3. No hay ninguna teoría. Las observaciones no pueden describirse o predecirse más allá de cierto punto, pues sólo son arbitrarias.

La tercera posibilidad se propuso como un argumento en contra de los científicos de los siglos XVII y XVIII. "¿Cómo podían formular leyes que restringieran la libertad de elección de Dios?". Y, sin embargo, lo hicieron, y consiguieron salirse con la suya. En épocas modernas hemos eliminado efectivamente la posibilidad 3 incorporándola en nuestro esquema: la mecánica cuántica constituye en esencia una teoría de lo que no sabemos ni podemos predecir.

La posibilidad 2 representa la imagen de una serie de estructuras a niveles cada vez más altos de energía. Como he dicho antes, esto parece poco probable, pues cabría esperar un posible cese en un nivel de energía Planck de 10^{28} eV. Sólo nos queda la posibilidad 1. De momento, la teoría de la supergravedad $N=8$ es la única candidata que aparece a la vista. Es probable que dentro de pocos años surjan una serie de cálculos decisivos que indiquen la posibilidad de demostrar que la teoría no es válida. Si la teoría sobrevive a estas pruebas, probablemente pasarán algunos años antes de que desarrollemos los sistemas informáticos que nos permitan hacer predicciones, y antes de que podamos explicar las condiciones iniciales del Universo y las leyes físicas locales. Éstos serán los problemas más importantes de la física teórica en los próximos veinte años más o menos. Pero, para concluir con una observación ligeramente alarmista, diré que la solución no puede producirse mucho tiempo después de ese límite. En la actualidad, las computadoras constituyen una útil ayuda para la investigación, pero es la mente humana la que las dirige. No obstante, si se considera el rápido desarrollo que están experimentando en los últimos tiempos, parece muy probable que puedan llegar a encargarse por sí mismas de todas las cuestiones relacionadas con la física teórica. Por eso, es posible que nos encontremos ante el fin de los físicos teóricos, si no de la física teórica.



BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **El Universo desbocado.** *Del big bang a la catástrofe final.* Paul Davies
2. **Gorilas en la niebla.** *Trece años viviendo entre gorilas.* Dian Fossey
3. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
4. **Superfuerza.** Paul Davies
5. **Las raíces de la vida.** *Genes, células y evolución.* M. Hoagland
6. **Microelectrónica.** *Las computadoras y las nuevas tecnologías.* Stefan M. Gergely
7. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
8. **De los átomos a los quarks.** James S. Trefil
9. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
10. **¡Que viene el cometa!** Nigel Calder
11. **Las plantas.** *«Amores y civilizaciones» vegetales.* Jean-Marie Pelt
12. **La frontera del infinito.** *De los agujeros negros a los confines del Universo.* Paul Davies
13. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig
14. **Izquierda y derecha en el cosmos.** *Simetría y asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo.* Martin Gardner
15. **Ecología humana.** *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell
16. **Introducción a la química.** Hazel Rossotti
17. **Sol, lunas y planetas.** Erhard Keppler

18. **Caníbales y reyes.** *Los orígenes de la cultura.* Marvin Harri
19. **Naturalistas curiosos.** Niko Tinbergen
20. **En busca del gato de Schrödinger.** *La fascinante historia (mecánica cuántica.* John Gribbin
21. **La mente I.** Anthony Smith
22. **La mente II.** Anthony Smith
23. **En la senda del hombre.** *Vida y costumbres de los chimpa* Jane Goodall
24. **La evolución de la física.** Albert Einstein y Leopold Infeld
25. **El Universo de Stephen Hawking.** John Boslough
26. **Un dios interior.** *El hombre del futuro como parte de un mı natural.* René Dubos

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING
JOHN BOSLOUGH

Este libro constituye la primera obra de divulgación sobre la vida y el trabajo de uno de los grandes genios de nuestro siglo, el excepcional científico Stephen Hawking. A través de sus páginas nos adentramos en el misterioso mundo de los agujeros negros y de los puntos del Universo —las singularidades— en los que el espacio y el tiempo se desintegran de forma total, y retrocedemos hasta el origen de los tiempos para asistir al Big-Bang del que, probablemente, surgió el Universo.
S. Hawking fue comparado con Einstein por la revista *Time* y considerado como «el brujo» del espacio y el tiempo por la revista *Omni*. La vida de este genio científico es un claro ejemplo de lo que es capaz de llevar a cabo la mente humana ante todo tipo de adversidades; aquejado por el mal de Lou Gehring, Hawking ha permanecido en una silla de ruedas desde que tenía 20 años, y a pesar del pronóstico pesimista que los especialistas emitieron sobre su parálisis, Stephen Hawking, no sólo ha conseguido sobrevivir sino que, además, ha contribuido de manera fundamental a aumentar el bagaje de conocimientos sobre el Universo.
John Boslough es licenciado en Historia de la Ciencia por la Universidad de Princeton y ha trabajado como director de temas científicos en *U. S. News World Report*. En 1981 ya publicó una semblanza de Stephen Hawking en las revistas *Science* y *Reader's Digest*. Asimismo es colaborador científico de la revista *National Geographic*.



25

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING - John Boslough

SALVAT

JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

JOHN BOSLOUGH

Este libro constituye la primera obra de divulgación sobre la vida y el trabajo de uno de los grandes genios de nuestro siglo, el excepcional científico Stephen Hawking. A través de sus páginas nos adentramos en el misterioso mundo de los agujeros negros y de los puntos del Universo —las singularidades— en los que el espacio y el tiempo se desintegran de forma total, y retrocedemos hasta el origen de los tiempos para asistir al Big-Bang del que, probablemente, surgió el Universo.

S. Hawking fue comparado con Einstein por la revista *Time* y considerado como «el brujo» del espacio y el tiempo por la revista *Omni*. La vida de este genio científico es un claro ejemplo de lo que es capaz de llevar a cabo la mente humana ante todo tipo de adversidades; aquejado por el mal de Lou Gehring, Hawking ha permanecido en una silla de ruedas desde que tenía 20 años, y a pesar del pronóstico pesimista que los especialistas emitieron sobre su parálisis, Stephen Hawking, no sólo ha conseguido sobrevivir sino que, además, ha contribuido de manera fundamental a aumentar el bagaje de conocimientos sobre el Universo.

John Boslough es licenciado en Historia de la Ciencia por la Universidad de Princeton y ha trabajado como director de temas científicos en *U. S. News World Report*. En 1981 ya publicó una semblanza de Stephen Hawking en las revistas *Science* y *Reader's Digest*. Asimismo es colaborador científico de la revista *National Geographic*.



25

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING - John Boslough

SALVAT

JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

JOHN BOSLOUGH

Este libro constituye la primera obra de divulgación sobre la vida y el trabajo de uno de los grandes genios de nuestro siglo, el excepcional científico Stephen Hawking. A través de sus páginas nos adentramos en el misterioso mundo de los agujeros negros y de los puntos del Universo —las singularidades— en los que el espacio y el tiempo se desintegran de forma total, y retrocedemos hasta el origen de los tiempos para asistir al Big-Bang del que, probablemente, surgió el Universo.
S. Hawking fue comparado con Einstein por la revista *Time* y considerado como «el brujo» del espacio y el tiempo por la revista *Omni*. La vida de este genio científico es un claro ejemplo de lo que es capaz de llevar a cabo la mente humana ante todo tipo de adversidades; aquejado por el mal de Lou Gehring, Hawking ha permanecido en una silla de ruedas desde que tenía 20 años, y a pesar del pronóstico pesimista que los especialistas emitieron sobre su parálisis, Stephen Hawking, no sólo ha conseguido sobrevivir sino que, además, ha contribuido de manera fundamental a aumentar el bagaje de conocimientos sobre el Universo.
John Boslough es licenciado en Historia de la Ciencia por la Universidad de Princeton y ha trabajado como director de temas científicos en *U. S. News World Report*. En 1981 ya publicó una semblanza de Stephen Hawking en las revistas *Science* y *Reader's Digest*. Asimismo es colaborador científico de la revista *National Geographic*.



25

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING - John Boslough

SALVAT

JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

JOHN BOSLOUGH

Este libro constituye la primera obra de divulgación sobre la vida y el trabajo de uno de los grandes genios de nuestro siglo, el excepcional científico Stephen Hawking. A través de sus páginas nos adentramos en el misterioso mundo de los agujeros negros y de los puntos del Universo —las singularidades— en los que el espacio y el tiempo se desintegran de forma total, y retrocedemos hasta el origen de los tiempos para asistir al Big-Bang del que, probablemente, surgió el Universo.

S. Hawking fue comparado con Einstein por la revista *Time* y considerado como «el brujo» del espacio y el tiempo por la revista *Omni*. La vida de este genio científico es un claro ejemplo de lo que es capaz de llevar a cabo la mente humana ante todo tipo de adversidades: aquejado por el mal de Lou Gehring, Hawking ha permanecido en una silla de ruedas desde que tenía 20 años, y a pesar del pronóstico pesimista que los especialistas emitieron sobre su parálisis, Stephen Hawking, no sólo ha conseguido sobrevivir sino que, además, ha contribuido de manera fundamental a aumentar el bagaje de conocimientos sobre el Universo.

John Boslough es licenciado en Historia de la Ciencia por la Universidad de Princeton y ha trabajado como director de temas científicos en *U.S. News World Report*. En 1981 ya publicó una semblanza de Stephen Hawking en las revistas *Science* y *Reader's Digest*. Asimismo es colaborador científico de la revista *National Geographic*.



EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING - John Boslough

JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

JOHN BOSLOUGH

Este libro constituye la primera obra de divulgación sobre la vida y el trabajo de uno de los grandes genios de nuestro siglo, el excepcional científico Stephen Hawking. A través de sus páginas nos adentramos en el misterioso mundo de los agujeros negros y de los puntos del Universo —las singularidades— en los que el espacio y el tiempo se desintegran de forma total, y retrocedemos hasta el origen de los tiempos para asistir al Big-Bang del que, probablemente, surgió el Universo.

S. Hawking fue comparado con Einstein por la revista *Time* y considerado como «el brujo» del espacio y el tiempo por la revista *Omni*. La vida de este genio científico es un claro ejemplo de lo que es capaz de llevar a cabo la mente humana ante todo tipo de adversidades: aquejado por el mal de Lou Gehring, Hawking ha permanecido en una silla de ruedas desde que tenía 20 años, y a pesar del pronóstico pesimista que los especialistas emitieron sobre su parálisis, Stephen Hawking no sólo ha conseguido sobrevivir sino que, además, ha contribuido de manera fundamental a aumentar el bagaje de conocimientos sobre el Universo.

John Boslough es licenciado en Historia de la Ciencia por la Universidad de Princeton y ha trabajado como director de temas científicos en *U.S. News World Report*. En 1981 ya publicó una semblanza de Stephen Hawking en las revistas *Science* y *Reader's Digest*. Asimismo es colaborador científico de la revista *National Geographic*.



EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING - John Boslough

JOHN BOSLOUGH

EL UNIVERSO DE STEPHEN HAWKING

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT